

Sveučilište u Zagrebu  
Fakultet strojarstva i brodogradnje

**UTJECAJ POLOŽAJA  
PRIJENOSNOG ETALONA SILE NA  
REZULTATE UMJERAVANJA**

**Završni rad**

**Krešimir Meštrović**

Zagreb, 2008.

Sveučilište u Zagrebu  
Fakultet strojarstva i brodogradnje

**UTJECAJ POLOŽAJA  
PRIJENOSNOG ETALONA SILE NA  
REZULTATE UMJERAVANJA**

**Završni rad**

Voditelj rada:  
Doc.dr.sc. Danko Ćorić

Krešimir Meštrović

Zagreb, 2008.



## IZJAVA

Izjavljujem da sam ovaj Završni rad izradio samostalno koristeći navedenu literaturu, te znanje stečeno na Fakultetu strojarstva i brodogradnje, Sveučilišta u Zagrebu, uz stručnu pomoć Doc.dr.sc. Danka Ćorića.

Krešimir Meštrović

## SADRŽAJ

<b>SAŽETAK.....</b>	<b>I</b>
<b>POPIS SLIKA.....</b>	<b>II</b>
<b>POPIS TABLICA.....</b>	<b>III</b>
<b>POPIS OZNAKA I MJERNIH JEDINICA.....</b>	<b>III</b>
<b>1. UVOD.....</b>	<b>1</b>
<b>2. MJERENJE SILE.....</b>	<b>2</b>
2.1 Razvoj sile kroz povijest.....	2
2.2 Općenito.....	3
2.3 Mjerenje sile.....	5
<b>3. SLJEDIVOST.....</b>	<b>7</b>
3.1 Općenito.....	7
3.2 Mjerna nesigurnost.....	10
<b>4. ETALONI SILE.....</b>	<b>12</b>
4.1 Prijenosni etaloni sile.....	14
4.1.1 Princip mjerenja sile prijenosnim etalonom.....	17
<b>5. UMJERAVANJE PRIJENOSNIH ETALONA SILE.....</b>	<b>19</b>
5.1 Općenito.....	19
5.2 Umjeravanje prijenosnih etalona sile prema normi EN ISO 376.....	21
5.2.1 Karakteristike etalona.....	21
5.2.2 Priprema za umjeravanje.....	22
5.2.3 Rezolucija ( $r$ ).....	23
5.2.4 Minimalna sila.....	23
5.2.5 Postupak umjeravanja.....	23
5.2.6 Kriteriji ocjenjivanja prijenosnog etalona.....	24
5.2.7 Klasifikacija prijenosnih etalona.....	26
5.2.8 Potvrde o umjeravanju.....	27
<b>6. EKSPERIMENTALNI DIO .....</b>	<b>28</b>
6.1 Plan eksperimenta .....	28
6.2 Osnovni podaci o referentom etalonu sile.....	29
6.3 Umjeravani prijenosni etalon .....	29
6.4 Rezultati umjeravanja .....	31
6.4.1 Rezultati mjerenja .....	31

6.4.2 Interpolacijske krivulje .....	41
6.4.3 Kriteriji ocjenjivanja .....	42
6.5 Analiza rezultata umjeravanja .....	44
<b>7. ZAKLJUČAK.....</b>	<b>49</b>
<b>8. LITERATURA.....</b>	<b>50</b>
<b>PRILOG I : Rezultati umjeravanja prijenosnog etalona Z4A/100 kN na udaljenosti 20 mm od osi aksijalog opterećivanja.....</b>	<b>51</b>
<b>PRILOG II : Rezultati umjeravanja prijenosnog etalona Z4A/100 kN na udaljenosti 40 mm od osi aksijalog opterećivanja.....</b>	<b>55</b>
<b>PRILOG III : Rezultati umjeravanja prijenosnog etalona Z4A/100 kN na udaljenosti 60 mm od osi aksijalog opterećivanja.....</b>	<b>59</b>

## SAŽETAK

U ovom završnom projektu teoretski i eksperimentalno obrađeno kako se mijenjaju pogreške prijenosnog etalona njegovim udaljavanjem od aksijalne osi opterećivanja.

U teoretskom dijelu opisuje se razvoj sile kroz povijest, neke osnove mjerenja sile te značajke fizikalne veličine sile. Također je dan osvrt na značenje mjerne sljedivosti te načini njenog ostvarivanja.

U eksperimentalnom dijelu provedeno je umjeravanje prijenosnog etalona sile Z4A/100 kN na različitim udaljenostima od aksijalne osi opterećivanja. Umjeravanje sukladno normi EN ISO 376 provedeno je na referentnom etalonu sile u Laboratoriju za ispitivanje mehaničkih svojstava Fakulteta strojarstva i brodogradnje. Rezultati mjerenja su obrađeni i analizirani te su doneseni odgovarajući zaključci.

## POPIS SLIKA

Slika 1:	Ispitivanje nosivosti grede (Galileo Galilei).....	2
Slika 2:	Uzroci nastanka sile.....	3
Slika 3:	Tijelo na nekoj podlozi.....	4
Slika 4:	Elastična savitljiva šipka.....	6
Slika 5:	Piramida sljedivosti.....	8
Slika 6:	Piramida sljedivosti etalona sile za Hrvatsku.....	9
Slika 7:	Nacionalni etalon sile Njemačke u PTB-u.....	12
Slika 8:	Referentni etalon sile u Hrvatskoj (LIMS).....	13
Slika 9:	Mjerno pojačalo i dinamometar.....	14
Slika 10a:	Dinamometar C16AC3.....	16
Slika 10b:	Dinamometar Z4.....	16
Slika 11:	Mjerna traka .....	16
Slika 12:	Wheatstoneov most.....	17
Slika 13:	Shema umjeravanja.....	19
Slika 14:	Akreditacija za umjeravanje mjerila sile.....	20
Slika 15:	Pozicije mjernih nizova .....	24
Slika 16:	Dvostruko složeni dinamometri referentnog etalona.....	29
Slika 17 :	Dinamometar tipa Z4A /100 kN.....	30
Slika 18:	MGC plus mjerno pojačalo.....	30
Slika 19:	Srednja vrijednost mjernog signala pri 10 kN .....	33
Slika 20:	Srednja vrijednost mjernog signala pri 20 kN.....	33
Slika 21:	Srednja vrijednost mjernog signala pri 30 kN.....	34
Slika 22:	Srednja vrijednost mjernog signala pri 40 kN.....	34
Slika 23:	Srednja vrijednost mjernog signala pri 50 kN.....	35
Slika 24:	Srednja vrijednost mjernog signala pri 60 kN.....	35
Slika 25:	Srednja vrijednost mjernog signala pri 70 kN.....	36
Slika 26:	Srednja vrijednost mjernog signala pri 80 kN.....	36
Slika 27:	Srednja vrijednost mjernog signala pri 90 kN.....	37
Slika 28:	Srednja vrijednost mjernog signala pri 100kN.....	37
Slika 29:	Relativna promjena mjernog signala pri rastućem nizu sila.....	39
Slika 30:	Relativna promjena mjernog signala pri padajućem nizu sila.....	40



Slika 31: Prikaz rezultata umjeravanja etalona Z4A/100 kN u aksijalnoj osi opterećivanja polinomom 3. stupnja.....	41
Slika 32: Relativna greška ponovljivosti bez rotacije u ovisnosti o sili.....	46
Slika 33: Relativna greška obnovljivosti s rotacijom u ovisnosti o sili.....	47
Slika 34: Relativna greška histereze u ovisnosti o sili.....	47
Slika 35: Relativno interpolacijska greška u ovisnosti o sili.....	48
Slika 36: Prikaz rezultata umjeravanja etalona Z4A/100 kN na udaljenosti 20 mm od aksijalne osi opterećivanja polinomom 3. stupnja.....	52
Slika 37: Prikaz rezultata umjeravanja etalona Z4A/100 kN na udaljenosti 40 mm od aksijalne osi opterećivanja polinomom 3. stupnja.....	56
Slika 38: Prikaz rezultata umjeravanja etalona Z4A/100 kN na udaljenosti 60 mm od aksijalne osi opterećivanja polinomom 3. stupnja.....	60

## POPIS TABLICA

Tablica 1: Referentni etaloni prema mehanizmima opterećenja i pripadne najbolje mjerne sposobnosti (proširene relativne mjerne nesigurnosti).....	14
Tablica 2: Simboli i njihove oznake pri umjeravanju prijenosnih etalona.....	21
Tablica 3: Dopuštena ograničenja deformacije.....	22
Tablica 4: Karakteristike prijenosnog etalona za određene klase.....	26
Tablica 5: Karakteristike referentnog etalona sile .....	29
Tablica 6: Karakteristike umjeravanog dinamometra.....	30
Tablica 7: Karakteristike mjernog pojačala.....	30
Tablica 8: Izmjerene vrijednosti i vrijednosti relativne greške nule kod predopterećenja za prijenosni etalon Z4A/100 kN u aksijalnoj osi opterećivanja.....	31
Tablica 9: Rezultata umjeravanja u aksijalnoj osi opterećivanja.....	31
Tablica 10: Srednje vrijednosti signala pri rastućoj i padajućoj sili u odnosu na udaljenosti od aksijalne osi opterećivanja.....	32
Tablica 11: Vrijednosti relativne promjene signala pri rastućoj sili za različite na udaljenosti od aksijalne osi opterećivanja.....	38
Tablica 12: Vrijednosti relativne promjene signala pri padajućoj sili za različite na udaljenosti od aksijalne osi opterećivanja.....	39
Tablica 13: Interpolirane vrijednosti i relativna interpolacijska greška za prijenosni etalon Z4A/100 kN u centru aksijalne osi.....	42
Tablica 14: Interpolirane vrijednosti za prijenosni etalon Z4A/100 kN u aksijalnoj osi opterećivanja.....	42
Tablica 15: Relativne vrijednosti greške nule za prijenosni etalon Z4A/100 kN.....	43
Tablica 16: Kriteriji za klasifikaciju prijenosnog etalona Z4A/100 kN u aksijalnoj osi opterećivanja.....	43
Tablica 17: Kriteriji ocjenjivanja i klasifikacija prijenosnog etalona Z4/100 kN u odnosu na udaljenosti od aksijalne osi opterećivanja.....	44
Tablica 18: Izmjerene vrijednosti i vrijednosti relativne greške nule kod predopterećenja za prijenosni etalon Z4A/100 kN na udaljenosti 20 mm od aksijalne osi opterećivanja.....	51
Tablica 19: Rezultata umjeravanja za prijenosni etalon Z4A/100 kN na udaljenosti 20 mm od aksijalne osi opterećivanja.....	51
Tablica 20: Interpolirane vrijednosti i relativna interpolacijska greška za prijenosni etalon Z4/100 kN na udaljenosti 20 mm od aksijalne osi opterećivanja .....	52
Tablica 21: Interpolirane vrijednosti za prijenosni etalon Z4A/100 kN na udaljenosti 20 mm od aksijalne osi opterećivanja.....	53

Tablica 22: Vrijednosti relativne greške nule za prijenosni etalon Z4A/100 kN na udaljenosti 20 mm od aksijalne osi opterećivanja.....	53
Tablica 23: Kriteriji za klasifikaciju prijenosnog etalona Z4A/100 kN na udaljenosti 20 mm od aksijalne osi opterećivanja.....	54
Tablica 24: Izmjerene vrijednosti i vrijednosti relativne greške nule kod predopterećenja za prijenosni etalon Z4A/100 kN na udaljenosti 40 mm od aksijalne osi opterećivanja.....	55
Tablica 25: Rezultata umjeravanja na udaljenosti 40 mm od aksijalne osi opterećivanja.....	55
Tablica 26: Interpolirane vrijednosti i relativna interpolacijske greške za prijenosni etalon Z4/100 kN na udaljenosti 40 mm od aksijalne osi opterećivanja.....	56
Tablica 27: Interpolirane vrijedosti za prijenosni etalon Z4A/100 kN na udaljenosti 40 mm od aksijalne osi opterećivanja.....	57
Tablica 28: Vrijednosti relativne greške nule za prijenosni etalon Z4A/100 kN na udaljenosti 40 mm od aksijalne osi opterećivanja.....	57
Tablica 29: Kriteriji za klasifikaciju prijenosnog etalona Z4A/100 kN na udaljenosti 40 mm od aksijalne osi opterećivanja.....	58
Tablica 30: Izmjerene vrijednosti i vrijednosti relativne greške nule kod predopterećenja za prijenosni etalon Z4A/100 kN na udaljenosti 60 mm od aksijalne osi opterećivanja.....	59
Tablica 31: Rezultata umjeravanja za prijenosni etalon Z4A/100 kN na udaljenosti 60 mm od aksijalne osi opterećivanja.....	59
Tablica 32: Interpolirane vrijednosti i relativna interpolacijska greška za prijenosni etalon Z4A/100 kN na udaljenosti 60 mm od aksijalne osi opterećivanja.....	60
Tablica 33: Interpolirane vrijednosti za prijenosni etalon Z4A/100 kN na udaljenosti 60 mm od aksijalne osi opterećivanja.....	61
Tablica 34: Vrijednosti relativne greške nule za prijenosni etalon Z4A/100 kN na udaljenosti 60 mm od aksijalne osi opterećivanja.....	61
Tablica 35: Kriteriji za klasifikaciju prijenosnog etalona Z4A/100 kN na udaljenosti 60 mm od aksijalne osi opterećivanja.....	62



## POPIS OZNAKA I MJERNIH JEDINICA

OZNAKA	MJERNA JEDINICA	ZNAČENJE
$a$	$\text{m/s}^2$	ubrzanje
$b$	%	relativna greška obnovljivosti s rotacijom
$b'$	%	relativna greška ponovljivosti bez rotacije
$E$	$\text{N/mm}^2$	modul elastičnosti
$F$	N	sila
$F_f$	N	nazivna sila dinamometra
$F_N$	N	maksimalna sila umjeravanja
$f_c$	%	relativno interpolacijsko odstupanje
$f_0$	%	relativna greška nule
$g$	$\text{m/s}^2$	gravitacijsko ubrzanje
$G$	N	sila teže
$G'$	N	sila reakcije
$i_f$	$\text{mV/V}$	očitanje na indikatoru nakon rasterećenja
$i_0$	$\text{mV/V}$	očitanje na indikatoru prije opterećenja
$k$	-	faktor pokrivanja
$L_0$	m	početna duljina tijela
$L$	m	duljina
$\Delta L$	m	promjena duljine tijela
$m$	kg	masa
$r$	N	rezolucija indikatora
$P$	N	sila reakcije
$P'$	N	sila akcije
$R$	$\Omega$	otpor
$\Delta R$	$\Omega$	promjena otpora
$S$	$\text{m}^2$	površina
$U$	%	proširena mjerna nesigurnost
$u$	%	kombinirana standardna mjerna nesigurnost
$u_A$	%	mjerna nesigurnost vrste A
$u_B$	%	mjerna nesigurnost vrste B
$U_{NE}$	%	najveća mjerna sposobnost
$V_0$	V	izlazni napon
$V_1$	V	ulazni napon
$X$	$\text{mV/V}$	izmjerena vrijednost pri rastućoj sili
$X_a$	$\text{mV/V}$	interpolirana vrijednost
$X'$	$\text{mV/V}$	izmjerena vrijednost pri padajućoj sili
$X_{\max}$	$\text{mV/V}$	maksimalna izmjerena vrijednost u nizovima 1, 3 i 5
$X_{\min}$	$\text{mV/V}$	minimalna izmjerena vrijednost u nizovima 1, 3 i 5
$X_N$	$\text{mV/V}$	izmjerena vrijednost koji odgovara maksimalnoj sili umjeravanja

$\bar{X}_r$	mV/V	srednja vrijednost očitavanja kod opterećivanja pri različitom položaju
$\bar{X}_{wr}$	mV/V	srednja vrijednost očitavanja kod opterećivanja pri istom položaju
$X_{sr}$	mV/V	srednje vrijednosti signala pri rastućoj sili
$X_{sr}'$	mV/V	srednje vrijednosti signala pri padajućoj sili
$\nu$	%	relativna greška histereze
$\varepsilon$	%	deformacija
$\sigma$	N/mm <sup>2</sup>	naprezanje
$\rho$	$\Omega$ m	specifični otpor

## 1.UVOD

Sila je vektorska veličina (određena je smjerom i iznosom) koja se definira kao mjera interakcije među tijelima. Mjerna jedinica za silu je 1 njutn [N]. Budući da je sila jedna od važnijih fizikalnih veličina, čija prva mjerenja datiraju još iz 16. st, vrlo je nužno njeno poznavanje te ispravno mjerenje.

Za različite sustave potrebne su različite točnosti mjerenja sile. Korištenjem pravilnih mjernih uređaja kao i mjernih tehnika, ostvaruju se pouzdana i točna mjerenja. Da bi mjerila sile pružala zadovoljavajuću kvalitetu mjerenja, odnosno da bi se izbjegle pogreške koje nastaju uslijed kvarova pojedinih dijelova, preopterećenja, istrošenosti vitalnih sklopova, moraju biti umjerena tj. „uspoređena“ s etalom na višoj mjeriteljskoj razini.

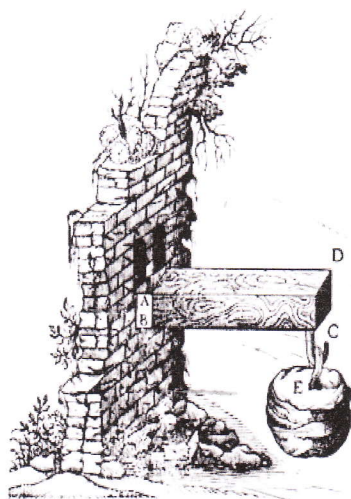
Isto tako će u ovom radu biti i objašnjena važnost i načini mjerenja sile te oni elementi mjeriteljstva koji osiguravaju pouzdanost i točnost mjerenja. Najviše će biti riječi o prijenosnim etalonima, principu njihova rada i postupku njihova umjeravanja. U eksperimentalnom dijelu biti će umjeren prijenosni etalon tipa Z4A nazivne sile 100 kN i to četiri puta, s početnim položajem etalona u centru aksijalne osi opterećivanja i njegovim pomakom od osi za 20 mm, 40 mm i 60 mm, a sve s ciljem da se rezultati umjeravanja usporede, tj. da se vidi kako se mijenjaju pogreške prijenosnog etalona njegovim udaljavanjem od aksijalne osi opterećivanja te da se na temelju podataka odredi klasa etalona za sva četiri mjerenja.

## 2. MJERENJE SILE

### 2.1 Razvoj sile kroz povijest

Aristotel je opisao silu kao nešto što uzrokuje da je objekt podvrgnut "neprirodnom gibanju".

Prvi pisani tragovi o mjerenjima sile datiraju još iz 16. stoljeća kada Galileo Galilei ispituje nosivost grede koja je jednostrano pričvršćena užetom za zid, a na drugom kraju greda je opterećena utegom određene mase (slika 1). Svoje rezultate formulirao je u fizikalnoj rečenici: "Čvrstoća raste proporcionalno širini, ali i s kvadratom visine grede". R. Hooke 1678. godine, nakon odgovarajućih pokusa s čeličnim oprugama, spoznaje zakon proporcionalnosti između sile i promjene oblika [1].



Slika 1: Ispitivanje nosivosti grede (Galileo Galilei)

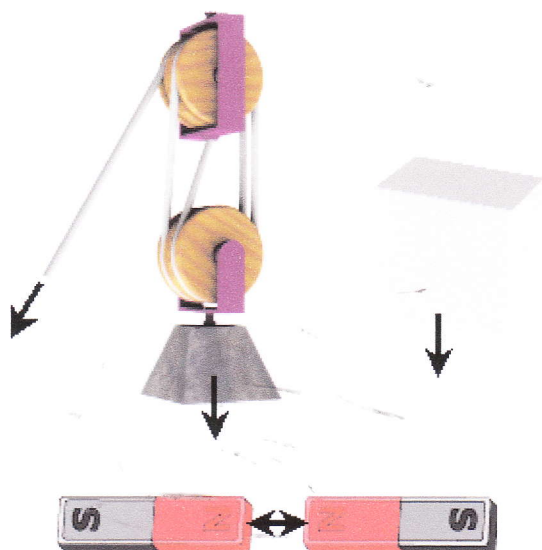
Isaac Newton u svojem djelu "Matematički principi prirodne filozofije" (Philosophiæ naturalis principia mathematica 1687.) opisuje osnovne pojmove mehanike, izvodi zakon gravitacije i teoriju gibanja planeta na osnovu zakona gravitacije, te objašnjava i tri zakona gibanja koja su temelj fizike [2].



## 2.2 Općenito

Sila je vektorska fizikalna veličina (određena je smjerom i iznosom) kojom se opisuje međudjelovanje tijela i njegove okoline. SI jedinica za silu je 1 Newton a to je sila koja proizvodi ubrzanje od  $1 \text{ m/s}^2$  kad djeluje na tijelo mase  $1 \text{ kg}$ , ( $\text{kgm/s}^2$ ) (nazvana tako prema Isaacu Newtonu).

Sila je često opisana kao guranje ili povlačenje. Ona može biti posljedica pojave kao što su gravitacija, magnetizam, ili bilo što drugo što uzrokuje da neka masa ubrzava (slika 2) [1].



Slika 2: Uzroci nastanka sile [1]

U znanosti o materijalima, djelovanje sile na tijelo proučava se prije svega zbog promatranja ponašanja materijala, a pomoću toga određuju se brojna mehanička svojstva materijala, koja su prije svega vezana uz promjenu oblika materijala, tj. ispitnog tijela. Sile kojima se djeluje na materijale mogu imati različite iznose te mogu djelovati na različite načine, s obzirom da je sila vektorska veličina. Prema tome razlikuju se različita opterećenja – vlak, tlak, smik, savijanje, torzija, zatim statičko i dinamičko opterećenje, kratkotrajno i dugotrajno opterećenje itd. [1].

Podjela sile:

- a) *Elektromagnetske sile*
- b) *Centrifugalna i centripetalna sila*
- c) *Nuklearna sila*
- d) *Gravitacijska sila*
- e) *Elastična sila*
- f) *Fiktivna sila*
- g) *Konzervativne sile*
- h) *Nekonzervativne sile* [2].

Silu i njeno djelovanje pobliže definiraju tri osnovna zakona – Newtonova zakona:

- I. Newtonov zakon: Tijelo koje miruje ustraje u mirovanju, a tijelo koje se giba jednoliko pravocrtno ustraje u tome gibanju sve dok to ne promijeni vanjska sila.

$$\vec{F} = 0 \Rightarrow \vec{a} = 0 \quad (2.1)$$

$\vec{a}$  - akceleracija ili ubrzanje, izraženo u  $\text{m/s}^2$

- II. Newtonov zakon: Akceleracija ili ubrzanje izravno je razmjerna rezultatnoj sili koja djeluje na tijelo i istog je smjera, a obrnuto je razmjerna masi tijela.

$$F = m \cdot a \quad (2.2)$$

- III. Newtonov zakon: Ako neko tijelo djeluje na drugo nekom silom, istodobno drugo tijelo djeluje na prvo silom jednake vrijednosti ali suprotnog smjera:

$$\vec{F}_{21} = -\vec{F}_{12} \quad (2.3)$$

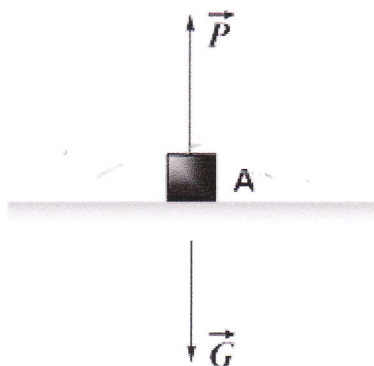
Uzevši u obzir navedeno može se analizirati ponašanje nekog tijela A, mase  $m$ , ukoliko na njega djeluje sila. Ako to tijelo držimo u ruci ono je tada u ravnoteži

Na tijelo djeluje zemljina sila teže silom  $G=gm$ , no tijelo ipak miruje. Možemo zaključiti, poznavajući zakon ravnoteže, da na tijelo djeluje bar još jedna sila  $P$ , jednaka po iznosu sili  $G$ , no protivnog smjera, tako da je zbroj sila na tijelo bude jednak nuli.

$$\vec{G} + \vec{P} = 0 \quad (\text{III. Newtonov zakon}) \quad (2.4)$$

Ako ispustimo tijelo, sila  $P$  nestaje i ono počinje padati prema tlu. Težina  $G$ , ako nije uravnotežena nekom drugom silom, daje tijelu akceleraciju.

Silu  $P$  koja dolazi od naše ruke, lako možemo zamijeniti drugim silama. Umjesto da tijelo držimo u ruci, možemo ga staviti na horizontalnu podlogu, na primjer na stol ili na ravnu, horizontalnu metalnu ploču. Silu  $P$ , koja uravnotežuje težinu  $G$ , daje sada podloga (sl. 3). Poučno je promatrati sile  $G$  i  $P$  sa stajališta drugog i trećeg Newtonova zakona.



Slika 3: Tijelo na nekoj podlozi

Dokle god tijelo A ne dodiruje podlogu, na njega djeluje samo težina  $G$  kojoj je reakcija  $G'$ , po trećem Newtonovom zakonu, jednakog iznosa, ali suprotnog smjera:

$$\vec{G} = -\vec{G} \quad (\text{III. Newtonov zakon}) \quad (2.5)$$

$G$  je sila kojom privlači Zemlja tijelo A.

Čim tijelo dotakne podlogu, pojavljuje se nova vrsta sile: otpornost podloge i tijela. To su sile s pomoću kojih se tijela opiru prodiranju jednog u drugo. Uobičajeno je smatrati da tijelo A djeluje akcijom  $P'$  na podlogu koja reakcijom  $P$  djeluje na tijelo A. Po trećem Newtonovom zakonu opet je

$$\vec{P} = -\vec{P} \quad (\text{III. Newtonov zakon}) [3]. \quad (2.6)$$

## 2.3 Mjerenje sile

Mjerenje sile je osnova za određivanje mehaničkih svojstava nekog materijala ili proizvoda. Mehanička svojstva materijala zauzimaju posebno mjesto među ostalim fizikalnim i kemijskim svojstvima, budući da se na osnovu njih dimenzioniraju dijelovi strojeva i uređaja. S pomoću mehaničkih svojstava može se objektivno ocijeniti kvaliteta materijala u prijamnoj kontroli poluproizvoda, te u završnoj kontroli proizvoda [4].

Samo ispitivanje sile provodi se na uređajima za mjerenje sile a najčešće su to kidalice različitih tipova i oblika. Tijekom uporabe ti uređaji gube na preciznosti, a posljedice koje nastanu uporabom takovih uređaja mogu biti dalekosežne. Zbog toga se provodi sistematska periodična kontrola ili provjera (umjeravanje) uređaja za mjerenje sile kroz jedno umjerno razdoblje, čija je najveća dopuštena vremenska granica propisana normama.

Umjeravanje mjerila sile može se provesti jednom od ove dvije metode:

- direktna i
- indirektna

Direktna metoda obuhvaća izravnu usporedbu sa poznatom gravitacijskom silom utega standardne mase. Vrijednosti mase i gravitacije moraju biti točno poznate.

Indirektna metoda obuhvaća mjerenje učinka sile na neko tijelo.

Primjeri primjene ove metode su:

- mjerenja akceleracije tijela sa poznatom masom koje je izloženo djelovanju sile,
- mjerenje resultantnog učinka (deformacije) kada se silom djeluje na elastične elemente.

Metoda s elastičnim elementima ima veću primjenu.

Razlozi veće primjene:

- a) veliki raspon mjerenja,
- b) mogućnosti kontinuiranog praćenja vrijednosti sile,
- c) jednostavnija uporaba,
- d) njihova otpornost.

Mjerila sile prema namjeni mogu biti:

- ispitna: kidalice i preše,
- etalonska: prijenosni etaloni sile, referentni etaloni sile i nacionalni etaloni sile.



Na najnižoj razini piramide sljedivosti za mjerenje sile nalaze se kidalice i preše. To su uređaji koji služe za ispitivanje ponašanja materijala u uvjetima djelovanja sile (vlačne, tlačne, savojne ili smične).

Način realizacije sile na kidalici:

- Mehanički
- Hidraulički [5].

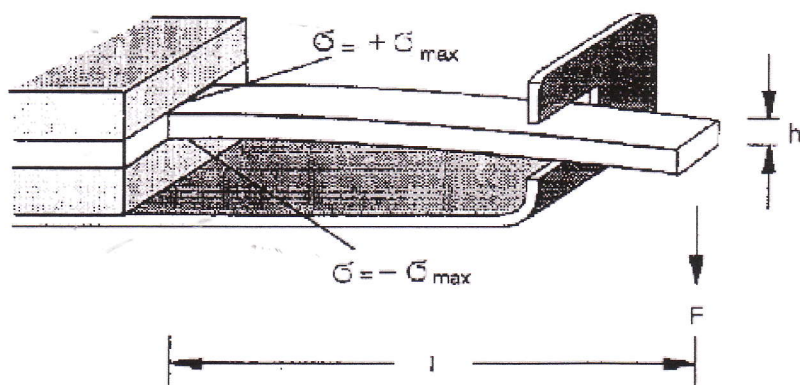
Uzrok sili potječe od otpora koji svako čvrsto tijelo pruža *deformaciji*. Težina tijela uzrokuje poremećaj u međusobnom položaju atoma drugog tijela, izazivajući tako sile koje se tom poremećaju, deformaciji tijela, protive.

Da težina tijela uistinu deformira tijelo, može se vidjeti ako se, na primjeru niti, mjeri njena duljina kad nit nije opterećena odnosno kada se na nit objesi neko tijelo. Postoji uvijek neko produljenje niti koje može biti vrlo malo, tako da je potrebno upotrijebiti mikroskop da bi se ono ustanovilo, no koje može biti vidljivo i golim okom. Dovoljno je da tijelo A objesimo na gumenu nit određene debljine i duljine ili da tijelo stavimo na podlogu od mekane gume. Produljenje niti ili smanjenje debljine podloge tada se lako može mjeriti.

Sila  $F$  koja djeluje na tijelo uzrokuje deformaciju toga tijela, koja može biti elastična ili plastična. Kod elastične deformacije vrijedi Hookeov zakon. Prema njemu, naprezanje  $\sigma = F/S$ , gdje je  $S$  površina na koju djeluje sila  $F$ , proporcionalno je preko Youngovog modula elastičnosti  $E$  relativnoj promjeni duljine tijela  $\varepsilon$ :

$$\sigma = \varepsilon \times E, \quad \varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0} \quad (2.7)$$

pri čemu je  $L_0$  početna duljina tijela, a  $\Delta L$  je produljenje. Za mjerenje manjih sila koristi se elastična savitljiva šipka (slika 4.) [6].



Slika 4: Elastična savitljiva šipka



### 3. SLJEDIVOST

#### 3.1 Općenito

Sljedivost rezultata mjerenja znači svojstvo rezultata mjerenja ili standarda koje se može dovesti u odnos s određenom referencom neprekinutim lancem usporedbi koje sve imaju navedenu mjernu nesigurnost. Navedena referenca može biti:

- a) brojčana referentna vrijednost koja je dodijeljena dogovorenom certificiranom referentnom materijalu (tzv. «brojčani standard»),
- b) vrijednost jedinice SI sustava,
- c) vrijednost dobivena mjerenjem pomoću dogovorene međunarodne referentne metode.

Usvajanjem tog zahtjeva osigurava se osnova za usporedivost rezultata mjerenja. Zato za svaku pojedinu analizu (kada je to moguće) protokol osiguranja kvalitete, sukladno normi HRN EN ISO/IEC 17025:2000, zahtijeva sljedivost do «navedene referentne vrijednosti» i izražavanje rezultata u mjernim jedinicama SI sustava (International System of Units). Ukoliko je referenca brojčana vrijednost koja je dodijeljena certificiranom referentnom materijalu (CRM), uz nju mora biti i prikaz priključenja samog CRM-a na lanac sljedivosti. U tom slučaju govorimo o pojmu sljedivosti samog certificiranog referentnog materijala ili eng. traceability [9].

Pod sljedivošću podrazumijeva se postupak kojim se pokazivanje mjerila (ili tvarne mjere) može usporediti s nacionalnim etalonom dotične mjerne veličine u jednom ili više koraka (stupnjeva).

To je svojstvo mjernog rezultata ili vrijednosti kojeg etalona po kojemu se on može dovesti u vezu s navedenim referencijskim etalonima (obično državnim ili međunarodnim) neprekinutim lancem usporedaba koje imaju utvrđene mjerne nesigurnosti.

U tim svim stupnjevima umjeravanje se provodi etalonom čija je metrologijska kakvoća određena umjeravanjem etalonom na višoj razini.

Sljedivost ispitivanja i mjerenja ne obuhvaća samo tehničke mjere poput umjeravanja, već i organizacijske u provedbi ispitivanja i mjerenja. S tog stajališta moraju se moći identificirati sve osobe koje su planirale i izvodile mjerenja ili su na neki drugi način sudjelovale u njima.

#### *Elementi sljedivosti*

Prema dokumentu EAL – G12 sljedivost se sastoji od više sastavnica koje ju karakteriziraju. Tako se sljedivost sastoji od slijedećih elemenata :

– *Neprekinuti lanac usporedaba* – kojima se može doći do etalona prihvatljiva za sve strane, obično nacionalnog ili međunarodnog etalona.

– *Mjerna nesigurnost* – mjerna se nesigurnost mora računati za svaki korak u lancu sljedivosti u skladu s određenim metodama, te mora biti iskazana tako da se za cijeli lanac može izračunati sveukupna mjerna nesigurnost.

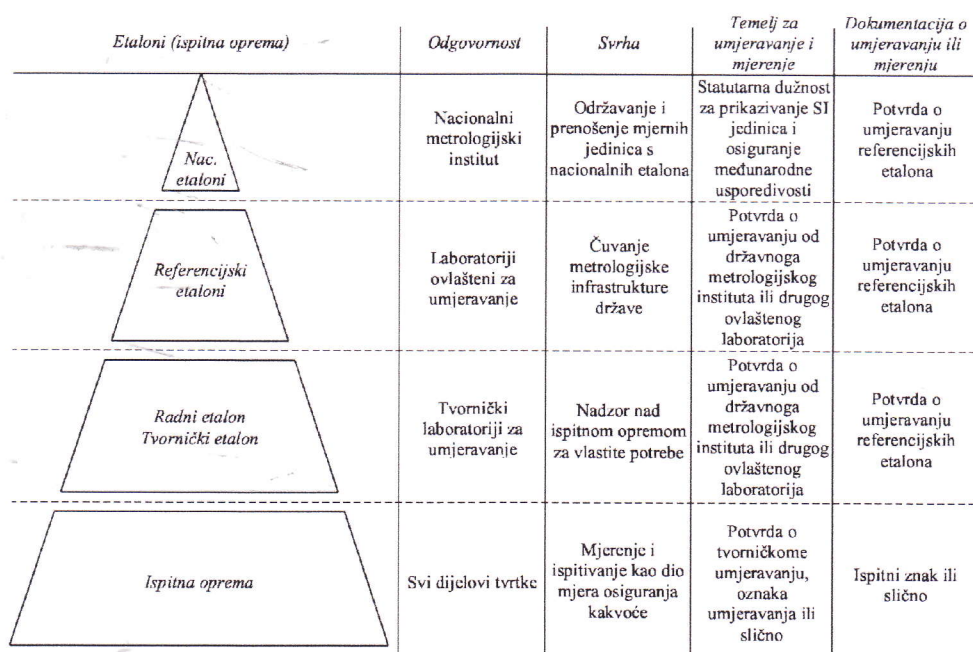
– *Dokumentacija* – svaki se korak u lancu mora provoditi u skladu s dokumentima i općenito prihvaćenim postupcima; rezultati se moraju dokumentirati na isti način.

– *Mjerodavnost* – laboratorij i tijela koja provode jedan ili više koraka u lancu umjeravanja moraju pružiti dokaz o svojoj tehničkoj mjerodavnosti (npr. dokazom o ovlašćivanju).

– *Upućivanje na SI jedinice* – lanac usporedaba mora završavati primarnim etalonima za ostvarenje SI jedinica.

– *Ponovna umjeravanja* – umjeravanja se moraju opetovati u odgovarajućim vremenskim razmacima; duljine tih razamaka ovise o nizu varijabla (npr. zahtjevanoj nesigurnosti, učestalosti uporabe, načinu uporabe, stabilnosti opreme) [7] .

Nprekinuti lanac usporedbi koji osigurava sljedivost određuje i shemu, tj. *piramidu sljedivosti*. U toj piramidi etaloni i mjerni uređaji posloženi su hijerarhijski prema svojoj mjeriteljskoj kakvoći. Pomoću etalona više razine umjerava se etalon niže razine i tako sve do mjerila i ispitne opreme kao što je npr. kidalica, koja je na najnižoj razini piramide. Dakle, umjeravanje ide s vrha prema dnu piramide. Piramida sljedivosti prikazana je slikom 5 [7].

<i>Etaloni (ispitna oprema)</i>	<i>Odgovornost</i>	<i>Svrha</i>	<i>Temelj za umjeravanje i mjerenje</i>	<i>Dokumentacija o umjeravanju ili mjerenju</i>
	Nacionalni metrologijski institut	Održavanje i prenošenje mjernih jedinica s nacionalnih etalona	Statutarna dužnost za prikazivanje SI jedinica i osiguranje međunarodne usporedivosti	Potvrda o umjeravanju referencijskih etalona
	Laboratoriji ovlašteni za umjeravanje	Čuvanje metrologijske infrastrukture države	Potvrda o umjeravanju od državnoga metrologijskog instituta ili drugog ovlaštenog laboratorija	Potvrda o umjeravanju referencijskih etalona
	Tvornički laboratoriji za umjeravanje	Nadzor nad ispitnom opremom za vlastite potrebe	Potvrda o umjeravanju od državnoga metrologijskog instituta ili drugog ovlaštenog laboratorija	Potvrda o umjeravanju referencijskih etalona
	Svi dijelovi tvrtke	Mjerenje i ispitivanje kao dio mjera osiguranja kakvoće	Potvrda o tvorničkome umjeravanju, oznaka umjeravanja ili slično	Ispitni znak ili slično

Slika 5: Piramida sljedivosti

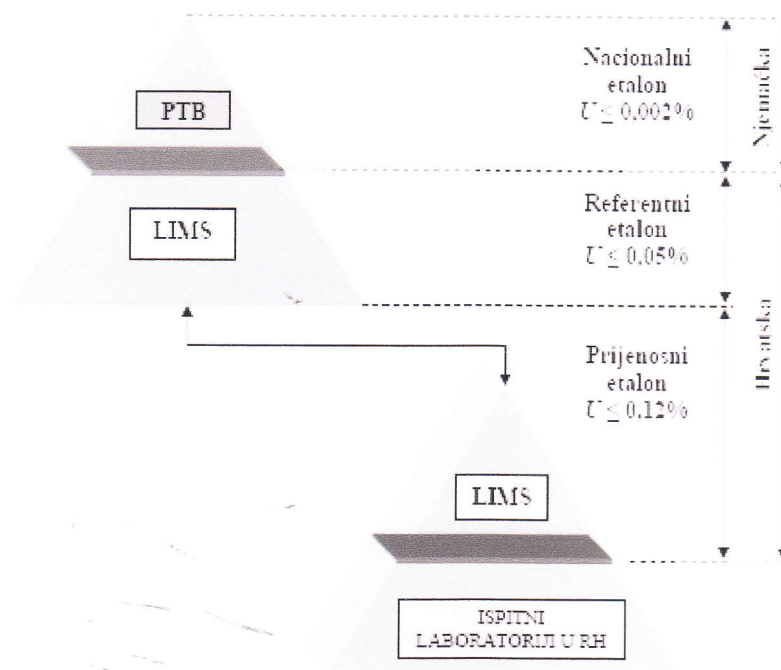
LIMS je instalacijom referentnog etalona s mjernom nesigurnošću  $< 0,05\%$  poboljšao svoju mjernu sposobnost te je postao jedan od vodećih laboratorija u regiji.

Instalacija referentnog etalona sile u LIMS - u je završena 2005. Instalacijom se predviđa smanjenje dosadašnje mjerne nesigurnosti koja je iznosila  $0,12\%$ .

Na vrhu piramide mjerne sljedivosti je krovna institucija u Njemačkoj PTB (Physikalische Technische Bundesanstalt), nacionalni institut za mjeriteljstvo sa znanstvene i tehničke uslužne funkcije, koja posjeduje nacionalni etalon čija je najveća mjerna sposobnost  $U_{NE} = 0,002\%$ .



Piramida sljedivosti etalona za silu za Hrvatsku prikazana je slikom 6.



Slika 6: Piramida sljedivosti etalona sile za Hrvatsku

Laboratorij za ispitivanje mehaničkih svojstva (LIMS) je nositelj državnog etalona za silu u mjernom području 50 N – 200 kN s najboljom mjernom sposobnošću 0,12%. Nositelj državnog etalona postao je nakon sklapanja ugovora sa DZM-om (Državni zavod za mjeriteljstvo) [10].

#### Zadaci LIMS-a

- održavanje nacionalnog standarda za mjerenje sile,
- izražavanje sljedivosti mjerenja do primarnih standarda,
- realizacija nacionalnih i međunarodnih međulaboratorijskih ispitivanja,
- suradnja s nacionalnim i međunarodnim organizacijama s ciljem unapređenja mjeriteljske infrastrukture u Republici Hrvatskoj, znanstvenog i stručnog usavršavanja osoblja, smanjenja nesigurnosti mjerenja sile,
- organizacija seminara i pružanje pomoći drugim mjeriteljskim organizacijama na području mjerenja sile u R. Hrvatskoj.

## Osiguranje sljedivosti

Osiguranje sljedivosti postiže se prvenstveno umjeravanjem i/ili verifikacijom mjerne i ispitne opreme u laboratorijima koji mogu pokazati svoju sljedivost i osposobljenost. Laboratoriji moraju imati razvijen umjerni sustav za svu opremu koja se nalazi u laboratoriju. Za opremu koja podliježe umjeravanju, laboratorij mora uspostaviti i provoditi program umjeravanja i/ili verifikacije opreme kako bi osigurao, gdje je to moguće, sljedivost mjerenja koja provodi do državnog, međunarodnog ili definicijskog etalona [9]

### 3.2 Mjerna nesigurnost

Mjerna nesigurnost, jedan od bitnih parametara sljedivosti rezultata mjerenja sile, je mjera sumnje u rezultat mjerenja, a procjenjuje se na osnovu objektivne i iskustvene (subjektivne) procjene samog analitičara. Objektivnom procjenom procjenjuje se standardna mjerna nesigurnost statističkom obradom serije mjerenja istom analitičkom metodom. Suprotno, iskustvena procjena standardne mjerne nesigurnosti doprinosi točnosti mjerenja poboljšanjem svih čimbenika koji mogu negativno utjecati na rezultat, a ne mogu se statistički prikazati. Sumnja u rezultat točno određenog mjerenja, preduvjet je za postavljanje granice mjerne nesigurnosti. Za ispunjenje tog zahtjeva svaki laboratorij mora odrediti vlastite ciljne granice mjerne nesigurnosti (eng. target measurement uncertainty) za svaku pojedinačnu metodu koja se koristi.

Mjerna nesigurnost rezultata iskazuje se standardnom devijacijom [standardna mjerna nesigurnost, (u)] ili višekratnikom standardne devijacije [proširena mjerna nesigurnost, (U)]. Tom vrijednošću određuje se raspon vrijednosti unutar kojega očekujemo da se nalazi (stvarna) vrijednost mjerene veličine. Uzroci odstupanja najbolje procjene mjerene veličine od stvarne vrijednosti mogu biti slučajni ili sistematski. Zbog toga je kombinirana standardna mjerna nesigurnost (u) jednaka drugom korijenu iz zbroja kvadrata pojedinih komponenata:

$$u = \sqrt{u_A^2 + u_B^2} \quad (3.1)$$

gdje su:  $u_A$  – mjerna nesigurnost vrste A

$u_B$  – mjerna nesigurnost vrste B

$u$  – kombinirana standardna mjerna nesigurnost

Proširena mjerna nesigurnost (U) izražava se množenjem kombinirane mjerne nesigurnosti s faktorom pokrivanja (k):

$$U = u \cdot k \quad (3.2)$$

gdje su:  $k$  – numerički faktor koji je obično u rasponu od 2 do 3.

$u$  – kombinirana standardna mjerna nesigurnost

$U$  – proširena mjerna nesigurnost [9]

Izraz mjerna nesigurnost usko je povezan s točnošću mjerenja. Dok je nesigurnost kvantitativni parametar pridružen rezultatu mjerenja, točnost mjerenja koristi se u kvalitativnom smislu i općenito opisuje bliskost slaganja mjernog rezultata s stvarnom vrijednošću mjerene

veliĉine. Od dva mjerenja iste veliĉine toĉnije je ono kojemu je pridruŹena manja mjerna nesigurnost. Isto tako potrebno je razlikovati izraz pogreška od pojma nesigurnost. Po definiciji pogreška mjerenja je mjerni rezultat umanjen za stvarnu vrijednost mjerene veliĉine. Iz ovog je vidljivo da se mjernu nesigurnost moŹe opisati kao mjerom moguće pogreške rezultata.

Najbolja mjerna sposobnost predstavlja najmanju vrijednost proširene mjerne nesigurnosti odreĊene s faktorom pokrivanja  $k=2$  koji odgovara razini povjerenja od 95%.

Najbolja mjerna sposobnost jedan je od parametara koji se upotrebljavaju za odreĊivanje opsega djelovanja ovlaštenog laboratorija. U dokumentu Europske suradnje na ovlašćivanju EA-04/02: "Expression of the Uncertainty of Measurement in Calibration" najbolja mjerna sposobnost (uvijek se odnosi na kakvu posebnu veliĉinu odnosno mjerenu veliĉinu) definira se kao najmanja mjerna nesigurnost koju laboratorij moŹe postići u okviru svog ovlaštenja kad provodi više ili manje svakodnevna umjeravanja gotovo idealnih mjernih etalona ĉija je svrha definirati, ostvarivati, ĉuvati ili obnavljati jedinicu te veliĉine ili jednu ili više njezinih vrijednosti ili kad provodi više ili manje svakodnevna umjeravanja gotovo idealnih mjerila namjenjenih za mjerenje te veliĉine [1].



## 4. ETALONI SILE

Etalon može biti materijalizirana mjera, mjerilo, referencijska tvar ili mjerni sustav namijenjen za određivanje, ostvarivanje, čuvanje ili obnavljanje neke veličine [7].

Podjela etalona:

- Primarni etalon: Etalon koji je izabran ili za koji je opće prihvaćeno da ima najveću mjeriteljsku kakvoću, a čija se vrijednost potvrđuje bez upućivanja na druge etalone iste veličine.
- Međunarodni etalon: Etalon priznat dogovorom da bi služio kao međunarodna osnova za dodjeljivanje vrijednosti drugim etalonima određene veličine.
- Državni etalon: Etalon priznat odlukom koje države da bi služio u toj državi kao osnova za dodjeljivanje vrijednosti drugim etalonima određene veličine.
- Referentni etalon: Etalon koji općenito ima najveću mjeriteljsku kakvoću na danom mjestu ili u danoj organizaciji iz kojeg se izvode mjerenja koja se tu provode.
- Posrednički etalon: Etalon koji se upotrebljava kao posrednik za usporedbu etalona.
- Prijenosni etalon: Etalon, katkad posebne konstrukcije, namijenjen za prijenos na različita mjesta.
- Radni etalon: Etalon koji se redovito upotrebljava za umjeravanje ili provjeru tvornih mjera, mjerila ili referentnih tvari. Radni etaloni mogu također biti istodobno referentni etaloni. To je posebno slučaj za radne etalone koji se izravno umjeravaju prema etalonima nacionalnih mjeriteljskih instituta [11].

Etalon najviše mjeriteljske kakvoće je primarni etalon. On se koristi isključivo za usporedbe s rezervnim ili referentnim etalomom, a ne koristi se za izravna mjerenja. Njegove vrijednosti se prihvaćaju bez pozivanja na ostale etalone iste kakvoće.

Budući da je jedinica za silu N izvedena jedinica u SI sustavu, slijedi da ne postoji međunarodni primarni etalon za silu, već postoje primarni etaloni sile za određenu državu ili mjeriteljsko područje, tzv. *nacionalni etaloni* (slika 7) i to su etaloni najveće kakvoće u nekoj državi. Provjera rezultata nacionalnog etalona za silu se provodi programom međulaboratorijskih mjerenja.



Slika 7: Nacionalni etalon sile Njemačke u PTB-u [12]

Nacionalni etalon sile je uređaj s utezima gdje sila direktno nastaje bez mehanizama kao što su poluge i slični elementi. Masa ovih utega utvrđena je pomoću usporedbe sa referentnim etalonom koji se može povezati primarnim etalonom za masu. Utezi korišteni u nacionalnom etalonu sile trebaju se izraditi od valjanog ili lijevanog metala, a mase utega trebaju se utvrditi s točnošću od 0,005% usporedbom sa referentnim etalonima usporedivim sve do primarnog etalona za masu koji se čuva u Sevresu, Francuska.

Kako je gravitacija izvedena veličina i njena vrijednost se može izmjeriti s nesigurnošću reda  $10^{-6}$  pa se nepoznata sila može usporediti sa gravitacijskom silom nesigurnošću tog reda veličine [8].

#### ZADACI NACIONALNIH MJERITELJSKIH INSTITUTA

- Ostvarenje, razvoj i održavanje državnih etalona;
- Održavanje sljedivosti državnih prema međunarodnim etalonima;
- Održavanje sljedivosti referencijskih etalona;
- Uspostavljanje međusobnog priznavanja nacionalnih etalona – sudjelovanje u međuregionalnim i međulaboratorijskim usporednim mjerenjima [12].

*Referentni etaloni* u piramidi sljedivosti su na razini niže od nacionalnih i vrijednosti njihove nesigurnosti se deriviraju preko umjeravanja na nacionalnom etalonu. Referentni etaloni su stabilni uređaji za mjerenje sile i nalaze se u akreditiranim umjernim laboratorijima i tako ostvaruju mjernu sljedivost između nacionalnog etalona i ostalih uređaja za mjerenje sile na nekom području.

Na slici 8 je prikazan referentni etalon sile u Hrvatskoj.



Slika 8: Referentni etalon sile u Hrvatskoj (LIMS)



Očekivane najbolje mjerne sposobnosti postignute pomoću referentnih etalona ovise o tipu realizacije sile. U tablici 1 sadržane su vrijednosti najbolje mjerne sposobnosti ovisno o tipu realizacije sile [8].

Tablica 1: Referentni etaloni prema mehanizmima opterećenja i pripadne najbolje mjerne sposobnosti (proširene relativne mjerne nesigurnosti)

Tipovi referentnih etalona prema mehanizmu opterećivanja	Najbolja mjerna sposobnost (proširena relativna mjerna nesigurnost)
Mehanizam opterećivanja direktno utezima	$5 \times 10^{-5}$ do $1 \times 10^{-4}$
Hidraulični mehanizam opterećivanja	$1 \times 10^{-4}$ do $5 \times 10^{-4}$
Polužni mehanizam opterećivanja	$1 \times 10^{-4}$ do $5 \times 10^{-4}$
Komparatorni sustav	do $5 \times 10^{-3}$

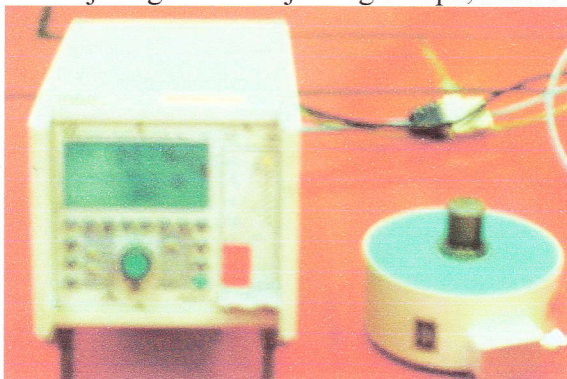
*Prijenosni etaloni* su etaloni, katkad posebne konstrukcije, namijenjeni su prijenosu određene vrijednosti sile na različita mjesta. Koriste se za umjeravanje drugih etalona ili uređaja za mjerenje sile koji su na nižoj mjeriteljskoj razini od referentnog etalona, a sami se umjeravaju na referentnim etalonima.

#### 4.1 Prijenosni etaloni sile

Danas se prijenosni etaloni najviše koriste kao elastični mjerni uređaji, a princip njihova rada se temelji na uspoređivanju pokazanih vrijednosti na tom uređaju sa vrijednostima koje se očitaju na skali umjeravane opreme. Elastični mjerni uređaji koji mjere elastične deformacije ili otklon se sastoje od:

- dinamometra (deformacijsko tijelo), slika 9
- mjernog pojačala,
- pokazni uređaj(očitavanje),
- kabela za spajanje komponenti [8].

Mjerno pojačalo i pokazni uređaj mogu biti dio jednog sklopa, slika 9.



Slika 9: Mjerno pojačalo i dinamometar



Programski paket koji se koristi za prikupljanje i obradu podataka umjeravanja CatMan omogućava:

- Konfiguriranje mjernog lanca
- Akviziciju podataka
- Vizualizaciju mjernih podataka
- Izradu izvješća [13]

Općenito, mjerno pojačalo ili jednostavno pojačalo je bilo koji uređaj koji mijenja, obično pojačava ulazni signal.

Mjerna pojačala se koriste i za daljnju obradu mjernog signala (sabiranje, oduzimanje, množenje, logaritmiranje, integriranje, i slične matematičke operacije). Sama procedura obrade mjernog signala može se vršiti na dva načina: digitalno ili analogno. Analogna tehnika podrazumijeva korištenje različitih elektronskih krugova (kao operacijska pojačala) dok digitalna tehnika (koja je točnija) podrazumijeva korištenje softverskih paketa za odgovarajuću obradu ulaznih mjernih podataka. U nekim slučajevima potrebno je pojačati vrlo male vrijednosti ulaznog signala. U tom slučaju koristi se poseban tip pojačala, poznat kao mjerno pojačalo. Sastoji se od tri standardna operacijska pojačala. Osnovna prednost nad standardnim pojačalom je to što mu je diferencijalni ulazni otpor mnogo veći.

Svaki prijenosni uređaj koji omogućuje mjerenje sile naziva se *dinamometar*.

Dinamometri mogu biti opterećeni na:

- vlak,
- tlak,
- vlak i tlak.

Princip mjerenja dinamometra zasniva se na:

- promjeni duljine,
- promjeni volumena,
- električnoj ili magnetnoj promjeni.

Dinamometar se sastoji od tri osnovna elementa: kućišta, elastičnog elementa i elemenata s određenim električnim otporom, npr. DMS mjerne trake pričvršćene na elastični element.

Osnovne funkcije kućišta su:

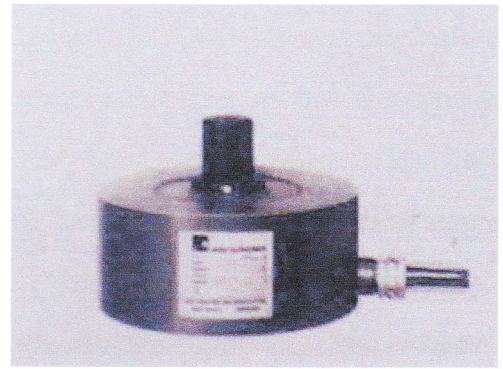
- omogućiti montažu dinamometra u drugi uređaj,
- omogućiti pravilan prijenos sile,
- štiti unutarnje elemente od vanjskih utjecaja.

Primjeri dinamometara:

- C16AC3 (slika 10a)
- Z4 (slika 10b)
- C18
- Z30 [14].



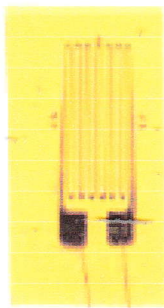
Slika 10a: Dinamometar C16AC3



Slika 10b: Dinamometar Z4

Neki tipovi mjernih traka su:

- a) Linearna traka (slika 11)
- b) T – rozeta
- c) Dvostruka smična traka



Slika 11: Mjerna traka [15]

### 4.1.1 Princip mjerenja sile prijenosnim etalonom

Kada određena sila djeluje na dinamometar, tj. na deformacijsko tijelo, on će se produljivati ili skraćivati, ovisno o smjeru sile te će se isto tako deformirati i mjerne trake. Efekt izduženja uslijed djelovanja sile može se iskoristiti za dobivanje električnog signala proporcionalnog primijenjenoj sili. Njihov otpor  $R$  ovisi o duljini  $L$ , poprečnom presjeku  $S$  i specifičnom otporu materijala od kojeg su izrađene  $\rho$ :

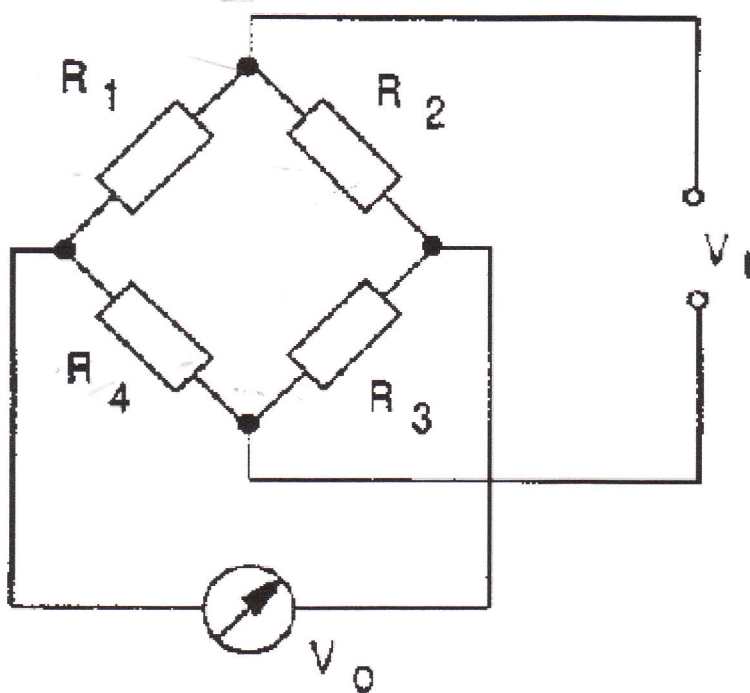
$$R = \rho \frac{L}{S} \quad (4.1)$$

Relativna promjena otpora inducirana promjenom duljine mjerne trake dana je sa izrazom:

$$\frac{\Delta R}{R} = k\varepsilon \quad (4.2)$$

pri čemu je faktor  $k$  karakteristična vrijednost mjerne trake i kreće se oko 2 za većinu standardnih slitina, a  $\varepsilon$  je deformacija. Mjerne trake mogu se izrađivati i od poluvodičkih materijala, čija se otpornost pri naprezanju značajnije mijenja pa je moguće dobiti osjetljiviji senzor, no nedostatak je nelinearna ovisnost relativne promjene otpora o deformaciji kao i značajnija temperaturna ovisnost. Mjerne trake se spajaju u Wheatstoneov most. Ovisno o broju traka razlikujemo četvrtinski most (1 mjerna traka), polovinski most (2 mjerne trake) i puni most (4 mjerne trake). Korištenjem punog i polovinskog mosta uvelike se mogu otkloniti utjecaji temperature okoline na mjerenje [6].

Na slici 12 je prikazan puni Wheatstoneov most sa 4 mjerna otpornika



Slika 12: Wheatstoneov most

Izlazni napon  $V_0$  ovisan je o ulaznom naponu  $V_1$  na sljedeći način:

$$V_0 = \frac{R_1 R_3 - R_2 R_4}{(R_1 + R_4)(R_2 + R_3)} V_1 \quad , \quad (4.3)$$

gdje su  $R_1, R_2, R_3$  i  $R_4$  otpori mjernih traka.

Izlazni napon  $V_0$  je u području milivolta i potrebno ga je pojačati mjernim pojačalom. Pošto most najčešće nije u ravnoteži kada nije prisutno opterećenje potrebno je kompenzirati namještanjem izlaznog napona na vrijednost nula [6].

Mjerna traka je pretvornik definirane otpornosti koji je pričvršćen za površinu mjernog objekta. Svaka deformacija mjernog objekta usljed opterećenja izaziva odgovarajuću deformaciju mjerne trake.

Da bi se od mjernih traka napravio Wheatston-ov most koriste se:

- Aktivne mjerne trake aplicirane na objekat ispitivanja ili mjerni pretvarač
- Kompenzacijske mjerne trake (pasivni elementi koji služe za kompenzaciju utjecaja temperature ili drugih efekata)
- Metalni (folijski) otpornici velike točnosti i stabilnosti [15].



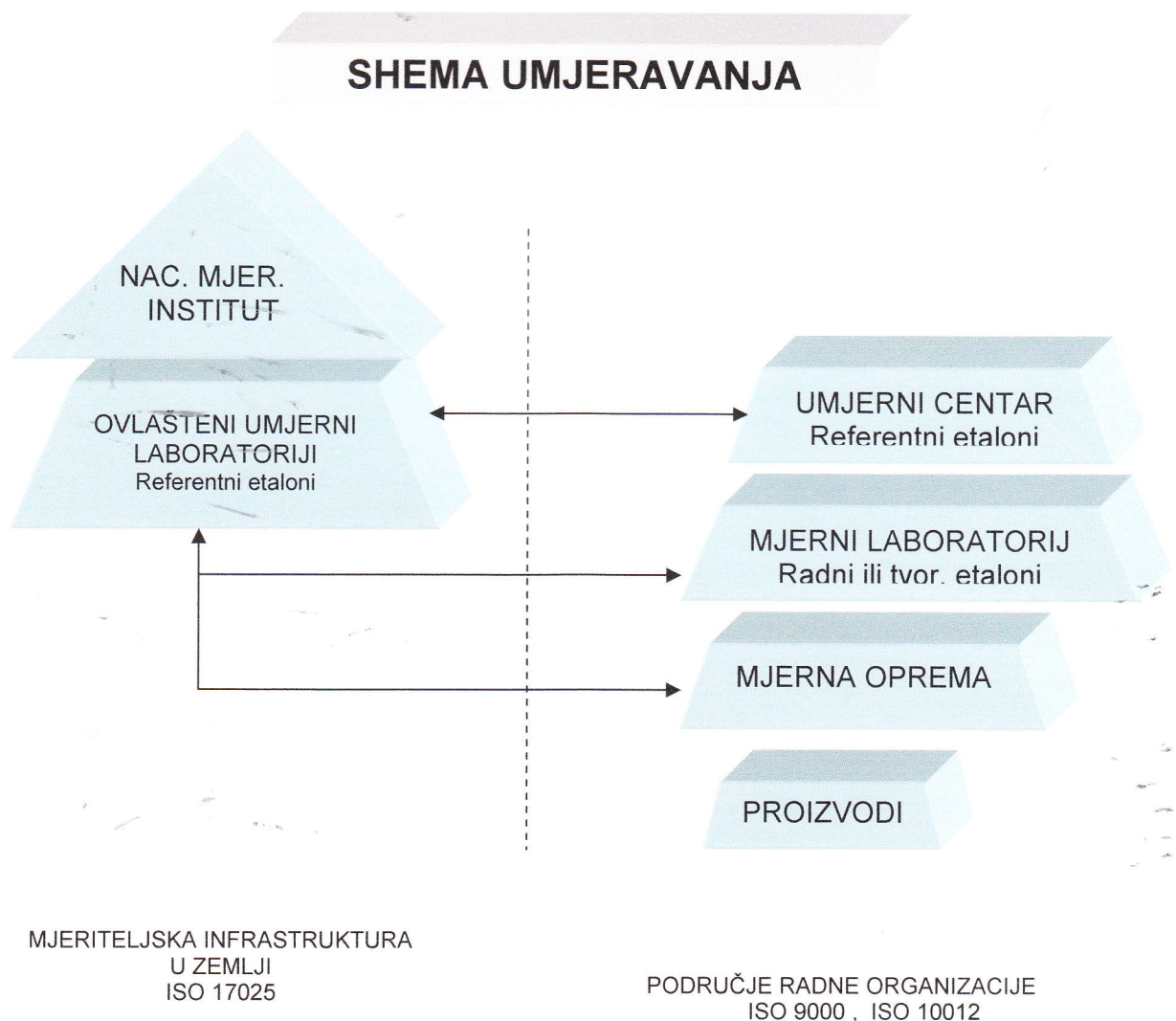
## 5. UMJERAVANJE PRIJENOSNIH ETALONA SILE

### 5.1 Općenito

Umjeravanje znači određivanje i dokumentiranje odstupanja mjerila od dogovorene "istinite" vrijednosti mjerene veličine. To je skup postupaka kojima se u određenim uvjetima uspostavlja odnos između vrijednosti veličina koje pokazuje neko mjerilo ili mjerni sustav ili vrijednosti koje pokazuje neka materijalizirana mjera ili neka referencijska tvar i odgovarajućih vrijednosti ostvarenih etalonima. To se dokazuje dokumentom – Potvrda o umjeravanju.

Osnovni razlog umjeravanja je da bi se osigurala ujednačenost mjerenja u tvrtki proizvođača proizvoda i kupca koji taj proizvod ugrađuje, odnosno mora postojati jamstvo da proizvođač i kupac mjere "istom mjerom" [7].

Na slici 13. prikazana je hijerarhija umjeravanja.



Slika 13: Shema umjeravanja

Uređaji za mjerenje sile tijekom uporabe gube na preciznosti, a razlozi mogu biti različita oštećenja, kvarovi određenih sklopova, itd. Zbog toga je nužna sistemska periodična kontrola uređaja za mjerenje sile kroz jedno umjerno razdoblje čije su najveće dopuštene granice

propisane normama. Europske norme koje se bave umjeravanjem mjernih uređaja za silu su DIN EN ISO 7500-1 i EN ISO 376.

Norma DIN EN ISO 7500-1 je norma za umjeravanje kidalica dok je norma EN ISO 376 za umjeravanje dinamometara koji se koriste za umjeravanje kidalica.

Umjeravanje mjerila i etalona sile prema nacionalnim etalonima važan je zahtjev za rad mjeriteljskih i ispitnih laboratorija jer je to preduvjet za ovlašćivanje takvih laboratorija u skladu s normom HRN EN ISO/IEC 17025. Redovitim umjeravanjem etalona i mjerila osigurava se sljedivost. Upravo su postupci umjeravanja ono što dovodi neko mjerilo ili etalon niže razine u direktnu vezu s primarnim etalom.

Mjerila i etaloni sile mogu se umjeravati sljedećim metodama:

- standardnim utezima,
- izbalansiranim polugama i standardnim utezima,
- elastičnim uređajima (prijenosni etaloni),
- kontrolnim epruvetama.

Pri umjeravanju mjerila sile prijenosni etaloni sile podvrgnuti su određenim uvjetima kao što su uvjeti okoliša, rukovanje, umjerna oprema, "software", prihvati i sl. koji tijekom vremena vode promjeni njihovih karakteristika.

Od veljači 2004. godine LIMS posjeduje priznatu akreditaciju dobivenu od strane DKD-a (Deutsche Kalibrierdienst), akreditacijskog tijela PTB-a, za umjeravanje mjerila sile u mjernom području od 50 N do 200 kN pod oznakom DKD-K-35602 sukladno normi ISO/IEC 17025. Akreditacija je prikazana na slici 14 [14].



Slika 14: Akreditacija za umjeravanje mjerila sile [14]



## 5.2 Umjeravanje prijenosnih etalona sile prema normi EN ISO 376 [16]

Umjeravanje se provodi prema normi EN ISO 376 i predviđena je za one etalone (dinamometar, pretvarač signala i uređaja za očitavanje) koji se koriste za umjeravanje jednoosnih kidalica.

U tablici 2 su simboli i veličine koje su značajne u postupku umjeravanja prijenosnog etalona

Tablica 2: Simboli i njihove oznake pri umjeravanju prijenosnih etalona

Simbol	Jedinica	Veličina
$b$	%	Relativna greška obnovljivosti s rotacijom
$b'$	%	Relativna greška ponovljivosti bez rotacije
$F_f$	N	Nazivna sila dinamometra
$F_N$	N	Maksimalna sila umjeravanja
$f_c$	%	Relativna interpolacijska greška
$f_0$	%	Relativna greška nule
$i_t$	mV/V	Očitavanje na indikatoru nakon rasterećenja
$i_0$	mV/V	Očitavanje na indikatoru prije opterećenja
$r$	N	Rezolucija indikatora
$v$	%	Relativna greška histereze
$X$	mV/V	Izmjerena vrijednost pri rastućoj sili
$X_a$	mV/V	Interpolirana vrijednost
$X'$	mV/V	Izmjerena vrijednost pri padajućoj sili
$X_{\max}$	mV/V	Maksimalna izmjerena vrijednost u nizovima 1, 3 i 5
$X_{\min}$	mV/V	Minimalna izmjerena vrijednost u nizovima 1, 3 i 5
$X_N$	mV/V	Izmjerena vrijednost koja odgovara maksimalnoj sili umjeravanja
$\bar{X}_r$	mV/V	Srednja vrijednost očitavanja kod opterećivanja pri različitom položaju
$\bar{X}_{wr}$	mV/V	Srednja vrijednost očitavanja kod opterećivanja pri istom položaju

Umjeravanje se sastoji od djelovanja poznatom silom na dinamometar i od bilježenja očitavanja na indikatoru.

### 5.2.1 Karakteristike etalona

Svi dijelovi etalona (uključujući i kablove za spajanje) moraju biti zasebno identificirani, a za dinamometar važno naznačiti nazivnu silu.

Dinamometar i prihvatni dijelovi za opterećenje moraju biti konstruirani tako da osiguraju aksijalno djelovanje sile, bilo vlačne, bilo tlačne.

Deformacija opterećenog elastičnog elementa može se mjeriti mehanički, električki, optički ili na neki drugi način, ali s odgovarajućom točnosti i stabilnosti. Način i kvaliteta mjerenja deformacije mogu utjecati na rezultate mjerenja, a time i na klasifikaciju etalona sil

### 5.2.2 Priprema za umjeravanje

Prije umjeravanja potrebno je utvrditi da li se etalon uopće može umjeriti. To se može ispitati preliminarnim testovima kao što je test preopterećenjem.

U testu preopterećenja etalon se izlaže preopterećenju četiri puta zaredom koje bi trebalo biti veće od nazivne sile najmanje 8%, a najviše 12%. Trajanje preopterećenja iznosi od 1 do 1,5 minuta. Barem jedan ovakav test treba izvršiti proizvođač prije nego što se etalon podvrgne umjeravanju.

Dalje treba osigurati:

- da kod vlačnih ispitivanja priključni dijelovi osiguraju aksijalnu primjenu silu,
- i da kod tlačnih ispitivanja nema interakcije između dinamometra i njegove potpore na uređaju na kojem se umjerava etalon.

Na dinamometar se stavljaju različite tlačne ploče – konkavne, konveksne i ravnog oblika i vrše se opterećivanja. U tu svrhu dinamometar se opterećuje s dvije ispitne sile, jednom koja odgovara nazivnoj sili etalona i drugom koja je jednaka minimalnoj sili umjeravanja. Ispitivanje se ponavlja kako bi se načinile tri primjene minimalne i maksimalne sile na svaki od tri tipa tlačnih ploča. Za svaku silu razlika između srednjih vrijednosti očitavanja dobivenih za konkavnu i ravnu ploču te između srednjih vrijednosti očitavanja dobivenih za konveksnu i ravnu tlačnu ploču ne smije prijeći granične vrijednosti navedene u tablici 3.

Za električne uređaje treba provjeriti da varijacija linijskog napona od  $\pm 10\%$  neće imati značajni utjecaj na umjeravanje.

Tablica 3: Dopuštena ograničenja deformacije

Klasa	Maksimalno dopuštena razlika, %	
	kod maksimalne sile	kod minimalne sile
00	0,05	0,1
0,5	0,1	0,2
1	0,2	0,4
2	0,4	0,8

Električne prijenosne etalone koji sadrže ugrađene mjerne trake potrebno je uključiti na izvor napajanja najmanje 30 min prije početka umjeravanja.



### 5.2.3 Rezolucija ( $r$ )

Rezolucija je ona minimalna promjena ulazne veličine za koju se još detektira promjena izlazne veličine.

Ovisno o tome da li je pokazivač analogni ili digitalni rezolucija se određuje na slijedeći način:

#### Analogna skala

Udaljenosti susjednih oznaka na skali trebaju biti jednake, a širina kazaljke treba biti približno ista širini oznake. Rezolucija treba biti određena iz odnosa širine kazaljke i udaljenosti dvije susjedne oznake na skali mjereno od centra jedne do centra druge oznake, a preporučeni su omjeri: 1:2, 1:5, 1:10. Da bi se očitala 1/10 podjele skale razmak između susjednih oznaka mora biti jednak ili veći od 1,25 mm.

#### Digitalna skala

Rezolucija je jedan prirast zadnje aktivne znamenke brojčanog indikatora.

Ako očitavanja variraju više od prije izračunate rezolucije (za neopterećeni uređaj), potrebno je rezoluciju uvećati za jednu polovinu raspona variranja. Rezolucija,  $r$ , treba biti izražena u mjernoj jedinici za silu.

### 5.2.4 Minimalna sila

S obzirom na točnost kojom se može očitati deformacija na uređaju u toku umjeravanja ili u toku daljnje upotrebe, minimalna sila  $F_{\min}$  primjenjena na etalonu mora zadovoljiti 2 uvjeta:

a) minimalna sila treba biti veće ili jednaka:

- $4000 \times r$  – za klasu 00
- $2000 \times r$  – za klasu 0,5
- $1000 \times r$  – za klasu 1
- $500 \times r$  za – za klasu 2

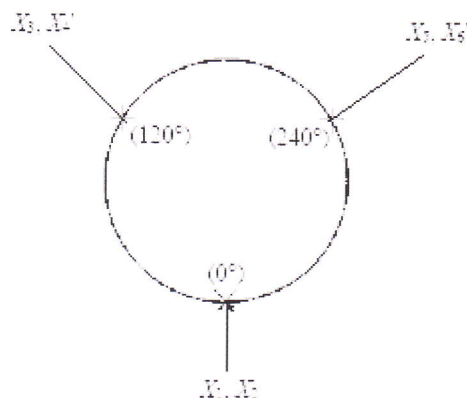
b) minimalna sila mora biti jednaka ili veća od  $0,02 F_f$  (nazivna sila dinamometra )

### 5.2.5 Postupak umjeravanja

Prije nego što se etalon optereti silama za umjeravanje u zadanom smjeru (tlak ili vlak), potrebno ga je opteretiti maksimalnom silom tri puta, svaki puta u trajanju od 1 do 1,5 minute. Predopterećenja moraju biti u istom smjeru i moraju djelovati na istom položaju kao i opterećenje, tj. sila koja slijedi nakon njih. Prije svake promjene smjera opterećenja u toku umjeravanja, potrebno je predopteretiti etalon u tom novom smjeru.

Silama za umjeravanje etalon se opterećuje u ukupno 6 mjernih nizova (slika 15). Kod prva dva niza sila ( $X_1$  i  $X_2$ ) ne mijenja se položaj dinamometra (položaj  $0^\circ$ ) i obadva niza su rastuća za određen korak sile. Nakon toga dinamometar se rotira za kut od  $120^\circ$  i slijedi mjerni niz ( $X_3$ ) koji je rastući, a četvrti ( $X_4$ ) opadajući. Dinamometar se ponovno rotira za  $240^\circ$  od početnog položaja te se opterećuje petim nizom rastućih sila ( $X_5$ ) i šestim nizom opadajućih ( $X_6$ ).

U svim nizovima jednak je korak sile koji određuje mjerne točke umjeravanja.



Slika 15: Pozicije mjernih nizova

Za određivanje interpolacijske krivulje, potrebno je po svakom mjernom nizu imati barem osam mjernih točaka različitih iznosa sile, a one trebaju biti što ravnomjernije raspoređene unutar umjeravanog mjernog područja.

U svakom mjernom nizu bilježe se i očitavanja kada ne djeluje sila, i to prije početka opterećivanja i nakon rasterećenja. Nakon rasterećenja potrebno pričekati 30 sekundi da bi se očitala vrijednost. Vremenski interval između susjednih nizova mjerenja treba iznositi barem 3 minute. Značajnija promjena nulnih očitavanja može ukazivati na plastičnu deformaciju uslijed preopterećenja dinamometra. Vremenski intervali između mjernih točaka unutar jednog mjernog niza trebaju biti što sličniji, a očitavanja bi se trebala raditi nakon najmanje 30 sekundi od početka djelovanja opterećenja.

U toku umjeravanja uređaji s odvojivim dijelovima trebali bi se barem jednom rastaviti, uglavnom između drugog i trećeg mjernog niza, a nakon sastavljanja potrebno je ponovno predopteretiti uređaj maksimalnom silom i to barem tri puta.

Temperatura bi u toku umjeravanja trebala biti između  $18^{\circ}$  i  $28^{\circ}$  C i stabilna s promjenom najviše  $\pm 1^{\circ}$  C. Temperaturu treba zabilježiti te treba omogućiti etalonu da postigne stabilnu temperaturu.

### 5.2.6 Kriteriji ocjenjivanja prijenosnog etalona

Kriteriji za klasifikaciju prijenosnih etalona sile, sukladno normi EN ISO 376, su:

- relativna greška obnovljivosti s rotacijom,
- relativna greška ponovljivosti bez rotacije,
- relativno interpolacijsko odstupanje,
- relativno odstupanje nul vrijednosti,
- relativna greška histereze.

*Relativna greška obnovljivosti s rotacijom, b* računa se za svaku silu umjeravanja, iz slijedećeg izraza:

$$b = \left| \frac{X_{\max} - X_{\min}}{\bar{X}_r} \right| \times 100 \quad (5.1)$$

gdje je

$$\bar{X}_r = \frac{X_1 + X_3 + X_5}{3} \quad (5.2)$$

Relativna greška ponovljivosti bez rotacije,  $b'$  također se računa za svaku silu umjeravanja, na temelju nizova 1 i 2, prema izrazu:

$$b' = \left| \frac{X_2 - X_1}{\bar{X}_{wr}} \right| \times 100 \quad (5.3)$$

gdje je

$$\bar{X}_{wr} = \frac{X_1 + X_2}{2} \quad (5.4)$$

Relativna interpolacijska greška,  $f_c$  određuje se na temelju polinoma 3. stupnja koji određuje ovisnost izlaznog signala o sili, a dobiven je iz rezultata mjerenja. Iz te vrijednosti može se procijeniti koliko dobro točke interpolirane polinomom aproksimiraju stvarne podatke umjeravanja. Ona se računa iz izraza:

$$f_c = \frac{\bar{X}_r + X_a}{X_a} \times 100 \quad (5.5)$$

Relativna greška nule,  $f_o$  dobiva se iz očitavanja nul vrijednosti prije i poslije svakog predopterećenja odnosno prije i poslije svakog mjernog niza:

$$f_o = \frac{i_f - i_0}{X_N} \times 100 \quad (5.6)$$

Kod klasifikacije etalona u razmatranje se uzima najveće dobiveno odstupanje nul vrijednosti.

*Relativna greška histereze,  $v$*

Ta greška je izračunata pri svakom umjeravanju za susjedne mjerne nizove kod kojih je jedan rastući, a drugi opadajući.

Razlika između vrijednosti očitanih za istu mjernu točku u rastućem i padajućem nizu omogućuje izračun relativne greške histereze iz slijedećih izraza:

$$v_1 = \left| \frac{X_4' - X_3}{X_3} \right| \times 100 \quad (5.7)$$



$$v_2 = \left| \frac{X_6' - X_5}{X_5} \right| \times 100 \quad (5.8)$$

a  $v$  se dobije kao aritmetička sredina  $v_1$  i  $v_2$

$$v = \frac{v_1 + v_2}{2} \quad (5.9)$$

Greška histereze uključuje grešku histereze dinamometra i grešku histereze referentnog etalona sile.

### 5.2.7 Klasifikacija prijenosnih etalona

Mjerno područje za koje se klasificira dinamometar određuje se tako da se razmatra svaka mjerna točka umjeravanja jedna za drugom, počevši od maksimalne pa prema minimalnoj i raspon klasifikacije završava kod zadnje sile za koju su još zadovoljeni uvjeti klasifikacije. Dinamometar može biti klasificiran ili za točno određene sile ili za interpolirane vrijednosti sila.

Klasifikacijski kriteriji

Područje za koje je etalon klasificiran trebalo bi izniti barem 50 – 100% nazivne sile  $F_N$ .

Kod etalona za točno određene vrijednosti sile kriteriji za klasifikaciju su:

- relativna greška ponovljivosti i obnovljivosti,
- relativno odstupanje nule,
- relativna greška histereze.

Kod etalona za interpolirane vrijednosti sile kriteriji za klasifikaciju su:

- relativna greška ponovljivosti i obnovljivosti,
- relativna interpolacijska greška,
- relativno odstupanje nule,
- relativna greška histereze.

U tablici 3 dane su vrijednosti različitih parametara u skladu sa pripadajućom klasom umjeravanog prijenosnog etalona i isto tako je dana mjerna nesigurnost.

Tablica 4. Karakteristike prijenosnog etalona za određene klase

Klasa	Relative pogreške, %					Nesigurnost primjenjene sile umjeravanja, % ( $k = 2$ )
	$b$	$b'$	$f_c$	$f_0$	$v$	
00	0.05	0.025	$\pm 0.025$	$\pm 0.012$	0.07	$\pm 0.01$
0,5	0.10	0.05	$\pm 0.05$	$\pm 0.025$	0.15	$\pm 0.02$
1	0.20	0.10	$\pm 0.10$	$\pm 0.050$	0.30	$\pm 0.05$
2	0.40	0.20	$\pm 0.20$	$\pm 0.10$	0.50	$\pm 0.10$

### 5.2.8 Potvrde o umjeravanju

Ako je etalon zadovoljio standarde u postupku umjeravanja, prema ovoj normi izdaje se potvrda, o umjeravanju koja sukladno normi ISO/IEC 17025 mora sadržavati sljedeće podatke:

- a) identifikacijske oznake svih dijelova prijenosnog etalona kao i podatke o uređaju na kojem je umjeravan te priključcima,
- b) način primjene sile (vlak / tlak),
- c) potvrdu da je uređaj u skladu sa zahtjevima preliminarnih testova,
- d) klasu i mjerno područje (ili specifične sile) za koje se može koristiti,
- e) datum, rezultate umjeravanja i ako je potrebno interpolacijsku krivulju,
- f) temperaturu na kojoj je provedeno umjeravanje.

Ovakva potvrda važeća je najviše 26 mjeseci, nakon čega se prijenosni etalon mora ponovo umjeriti. Etalon se umjerava i ranije ako je bio preopterećen silom većom od sile preopterećenja propisane u pripremi za umjeravanje ili nakon popravka.

#### *Primjena umjerenih etalona*

Etalon bi trebao biti opterećivan u skladu sa uvjetima pod kojima je umjeren. Da bi se izbjeglo opterećivanje silama većim od maksimalnih sila umjeravanja potrebno je poduzeti određene mjere koje sprečavaju takav način opterećivanja.

Uređaji koji su klasificirani za točno određene vrijednosti sila, trebali bi biti korišteni samo za te sile, dok uređaji koji su klasificirani za interpolaciju mogu biti korišteni za bilo koje vrijednosti sile u interpolacijskom području.

Ako je etalon korišten na temperaturi različitoj od temperature umjeravanja, očitavanje se korigira prema izrazu:

$$D_t = D_e [1 + K(t - t_e)] \quad (5.10)$$

gdje je

$D_t$  - očitavanje pri temperaturi  $t$ ,

$D_e$  - očitavanje pri temperaturi umjeravanja  $t_e$ ,

$K$  - temperaturni koeficijent za etalon izražen u jedinici  $1/^\circ\text{C}$ .

## 6. EKSPERIMENTALNI DIO

### 6.1. Plan eksperimenta

U eksperimentalni dijelu projekta proveden je postupak umjeravanja prijenosnog etalona sile, a dobiveni rezultati mjerenja su obrađeni i provedena je analiza rezultata. Umjeravan je prijenosni etalon tipa Z4A nazivne sile 100 kN. Umjeravanje je provedeno tlačnim opterećivanjem etalona. Etalon je prvo umjeren tako da je postavljen upravo u aksijalnoj osi opterećivanja. Sljedeća umjeravanja provedena su za udaljenosti etalona 20 mm, 40 mm i 60 mm od aksijalne osi opterećivanja.

Umjeravanje prijenosnog etalona izvršeno je na referentnom etalonu sile proizvođača GTM prema normi EN ISO 376. Prvo je etalon bio tri puta predopterećen maksimalnom silom i to u početnoj poziciji, zakrenut za  $120^\circ$  i zakrenut za  $240^\circ$ . Nakon toga izmjereno je ukupno šest nizova:  $X_1$ ,  $X_2$ ,  $X_3$  i  $X_5$  za rastuće vrijednosti sile te  $X_4'$  i  $X_6'$  za opadajuće vrijednosti sile. Nakon niza  $X_2$  dinamometar se rotirao za  $120^\circ$ , a nakon niza  $X_4$  za  $240^\circ$ . Pauze nakon svakog predopterećenja iznosile su 60 sekundi, a nakon svakog niza mjerenja 180 sekundi.

Promjenu deformacije elastičnog elementa u dinamometru električno pojačalo pokazuje kao promjenu napona u mV/V. Pri tome se promjena napona bilježila za svaku promjenu sile za konstantan korak, koji je ovdje iznosio 10% nazivne sile. Također su bilježene i nul vrijednosti.

Nakon mjerenja dobiveni podaci su obrađeni i uspoređeni. Pomoću polinoma 3. stupnja dalje su interpolacijom dobivene vrijednosti izlazne promjene napona za različite vrijednosti sila unutar umjeravanog područja. Osim jednadžbe umjeravanja, iz podataka mjerenja izračunate su za svaku mjernu točku greške etalona koje predstavljaju kriterije za njegovu klasifikaciju. Kriteriji kao i relativna promjena signala su prikazani i grafički u odnosu na vrijednost sile odnosno s obzirom na udaljenosti od aksijalne osi opterećivanja.



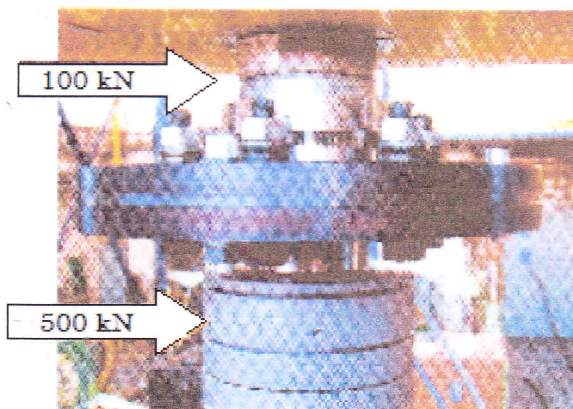
## 6.2 Osnovni podaci o referentnom etalonu sile

Umjeravanje prijenosnih etalona izvršeno je na referentnom etalonu proizvođača GTM a u Laboratoriju za ispitivanje mehaničkih svojstava (LIMS) Fakulteta strojarstva i brodogradnje (slika 8), čije su osnovne karakteristike prikazane su u tablici 5.

Tablica 5: Karakteristike referentnog etalona sile

KARAKTERISTIKE REFERENTNOG ETALONA SILE	
Proizvođač	GTM Gassmann Theiss Messtechnik, Njemačka
Tip	K - BNME
Serijski broj	163
Mjerno područje	10 – 500 kN
Nazivna sila	500 kN
Način opterećenja	Hidraulički
Mjerni sustav	Mjerno pojačalo, dvostruko složeni dinamometri

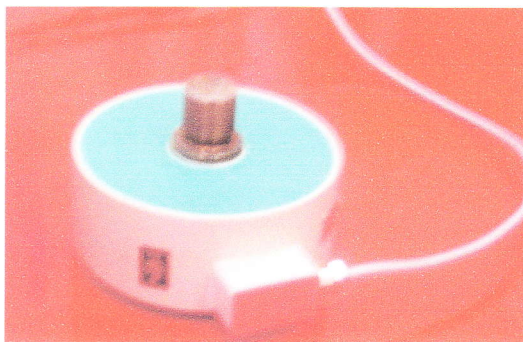
Referentni etalon pretvara deformaciju u dinamometru u izlazni električni signal koji dobijemo na mjernom pojačalu. Široko mjerno područje i visoka mjerna sposobnost osigurani su modelom dvostruko složenih visoko preciznih dinamometara (100 kN i 500 kN) prikazanih na slici 16.



Slika 16: Dvostruko složeni dinamometri referentnog etalona

## 6.3 Umjeravani prijenosni etalon

Umjeravani etalon je tipa Z4A, nazivne sile 100 kN (slika 17) priključen na mjerno pojačalo MGCplus (slika 18). Karakteristike umjeravanog dinamometra prikazane su u tablici 6, a u tablici 7 navedene su osnovne značajke pojačala MGCplus.



Slika 17 : Dinamometar tipa Z4A /100 kN

Tablica 6: Karakteristike vlačno tlačnog prijenosnog dinamometra

Proizvođač	HBM Hottinger Baldwin Messtechnik GMBH 64293 Darmstadt
Nazivna sila	100 kN
Tip	Z4A
Serijski broj	52830060
Dužina kabela (mm)	$L = 600$



Slika 18: MGCplus mjerno pojačalo

Tablica 7. Karakteristike mjernog pojačala

Proizvođač	HBM Hottinger Baldwin Messtechnik GMBH 64293 Darmstadt
Tip	MGCplus
Mjerni kanal	1
Mjerno područje	2,5 mV/V
Rezolucija	0,00001
Napon napajanja	5 V
Tip filtera	0,1 Hz Bessel



## 6.4 Rezultati umjeravanja

Ispitivanje je provedeno na prijenosnom etalonu od 100 kN, a podaci mjerenja su istovjetno obrađeni za sve udaljenosti. Kod umjeravanja etalona Z4A/100 kN u aksijalnoj osi opterećivanja dobiveni podaci su detaljnije objašnjeni. Sva objašnjenja jednako vrijede i za umjeravanja načinjena na udaljenostima 20 mm, 40 mm i 60 mm od aksijalne osi. Rezultati ovih umjeravanja dani su u prilogima I, II i III.

Temperatura umjeravanja iznosila je 20,4 °C.

### 6.4.1 Rezultati mjerenja

Prije provedbe mjernih nizova, etalon Z4A/100 kN tri puta je predopterećen do iznosa nazivne sile 100 kN pri čemu su zabilježena očitavanja kod nazivne vrijednosti kao i očitavanja prije opterećenja i nakon rasterećenja. U tablici 8 prikazani su rezultati mjerenja kod predopterećivanja s pripadnom vrijednošću relativne greške nule izračunatim prema izrazu 5.6.

Tablica 8: Izmjerene vrijednosti i relativna greške nule kod predopterećenja za prijenosni etalon Z4A/100 kN u aksijalnoj osi opterećivanja

	0°	120°	240°
Očitavanje kod nazivne vrijednosti, mV/V	1,99932	1,99949	1,99944
Očitavanje nakon rasterećenja, mV/V	0,00005	0,00003	0,00002
Vrijednost relativne greške nule kod predopterećenja, mV/V	0,0025	0,0015	0,001

U tablici 9 prikazani su rezultati umjeravanja prijenosnog etalona Z4/100kN u centru aksijalne osi. Kako je korak sile iznosio 10% nazivne sile, svaki mjerni niz sadrži po 10 mjernih točaka, a na početku i na kraju svakog niza očitane su i nul vrijednosti.

Tablica 9: Rezultata umjeravanja u aksijalnoj osi opterećivanja

Sila, kN	Isti ugradbeni položaj		Različiti ugradbeni položaj			
	X <sub>1</sub> , mV/V	X <sub>2</sub> , mV/V	X <sub>3</sub> , mV/V	X <sub>4</sub> ', mV/V	X <sub>5</sub> , mV/V	X <sub>6</sub> ', mV/V
0	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000
10	0,20003	0,20001	0,20000	0,20007	0,20000	0,20008
20	0,39995	0,39994	0,40000	0,40001	0,40000	0,40001
30	0,5999	0,59991	0,60000	0,59995	0,60000	0,59995
40	0,79976	0,79978	0,7998	0,79984	0,7998	0,79986
50	0,99969	0,99969	0,9997	0,99976	0,9997	0,99978
60	1,19961	1,19962	1,1997	1,19969	1,1997	1,19972
70	1,39952	1,39955	1,3996	1,39962	1,3996	1,39964
80	1,59952	1,59954	1,5996	1,59959	1,5996	1,59963
90	1,79948	1,7995	1,7995	1,79954	1,7996	1,79959
100	1,99946	1,99947	1,9995	-	1,9996	-
0	0,00003	0,00004	-	0,00006	-	0,00005



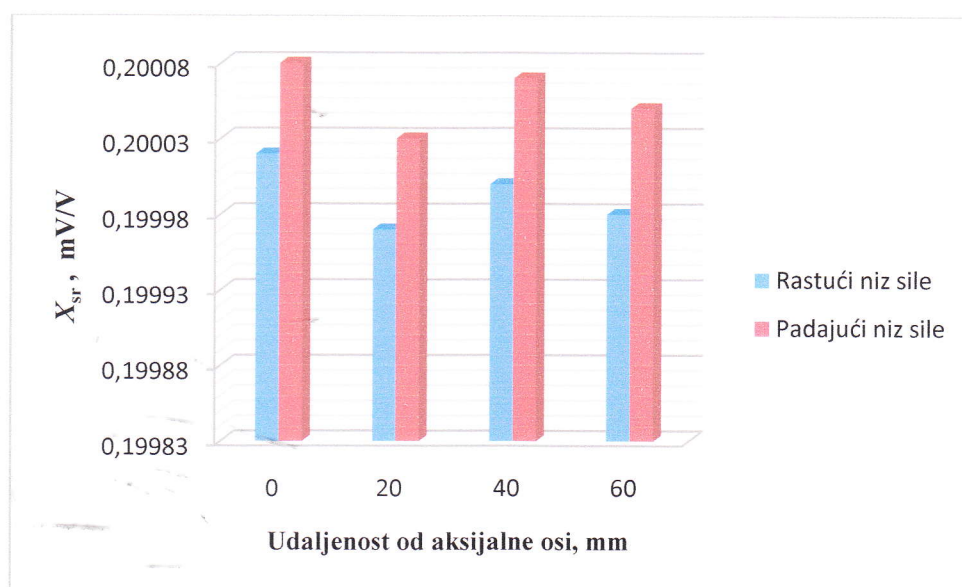
U tablici 10 su dane srednje vrijednosti izlaznog signala pri rastućoj i padajućoj sili.

Tablica 10: Srednje vrijednosti signala pri rastućoj i padajućoj sili u odnosu na udaljenosti od aksijalne osi opterećivanja

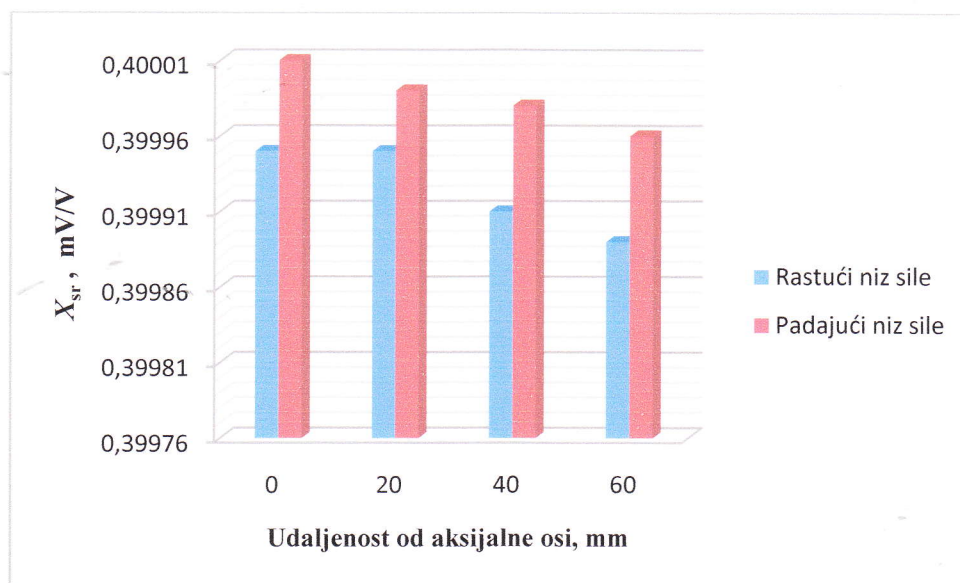
Udaljenost od aksijalne osi opterećivanja, mm	Sila, kN	$X_{sr}$ , mV/V	$X_{sr}'$ , mV/V
0	10	0,20002	0,20008
	20	0,39995	0,40001
	30	0,59992	0,59995
	40	0,79979	0,79985
	50	0,99970	0,99977
	60	1,19964	1,19970
	70	1,39957	1,39963
	80	1,59956	1,59961
	90	1,79953	1,79956
	100	1,99951	
20	10	0,19997	0,20003
	20	0,39995	0,39999
	30	0,59986	0,59989
	40	0,79978	0,79978
	50	0,99969	0,99972
	60	1,19960	1,19960
	70	1,39956	1,39956
	80	1,59952	1,59949
	90	1,79954	1,79947
	100	1,99949	
40	10	0,20000	0,20007
	20	0,39991	0,39998
	30	0,59981	0,59985
	40	0,79973	0,79979
	50	0,99964	0,99969
	60	1,19958	1,19961
	70	1,3995	1,39952
	80	1,59951	1,59948
	90	1,79948	1,7994
	100	1,99945	
60	10	0,19998	0,20005
	20	0,39989	0,39996
	30	0,59977	0,59982
	40	0,79969	0,79976
	50	0,99961	0,99968
	60	1,19955	1,1996
	70	1,39946	1,39948

	80	1,59948	1,59945
	90	1,79945	1,79936
	100	1,99943	

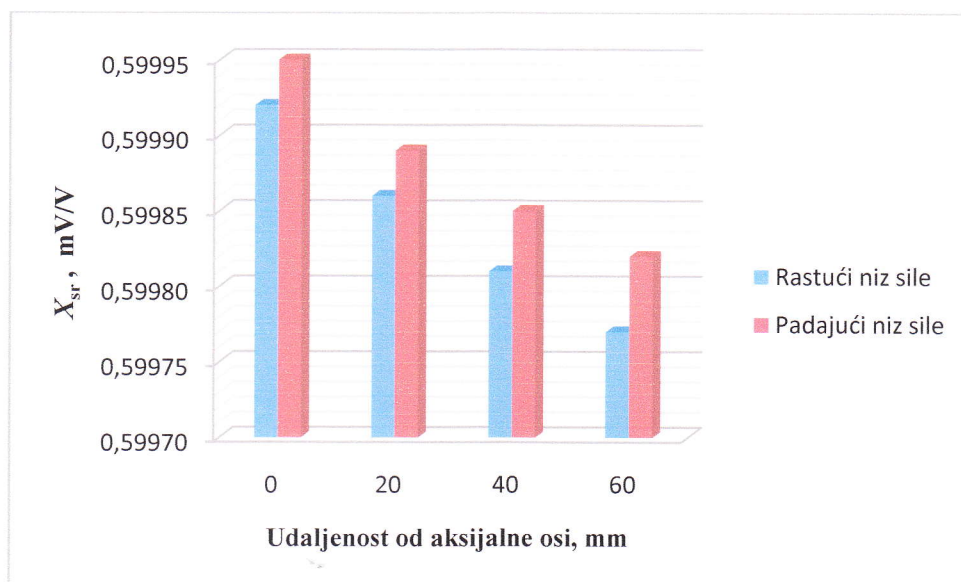
Ovisnost srednjih vrijednosti signala pri padajućoj sili i pri rastućoj sili u odnosu na udaljenosti od aksijalne osi opterećivanja prikazana je na slikama 19, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 26, 27 i 28.



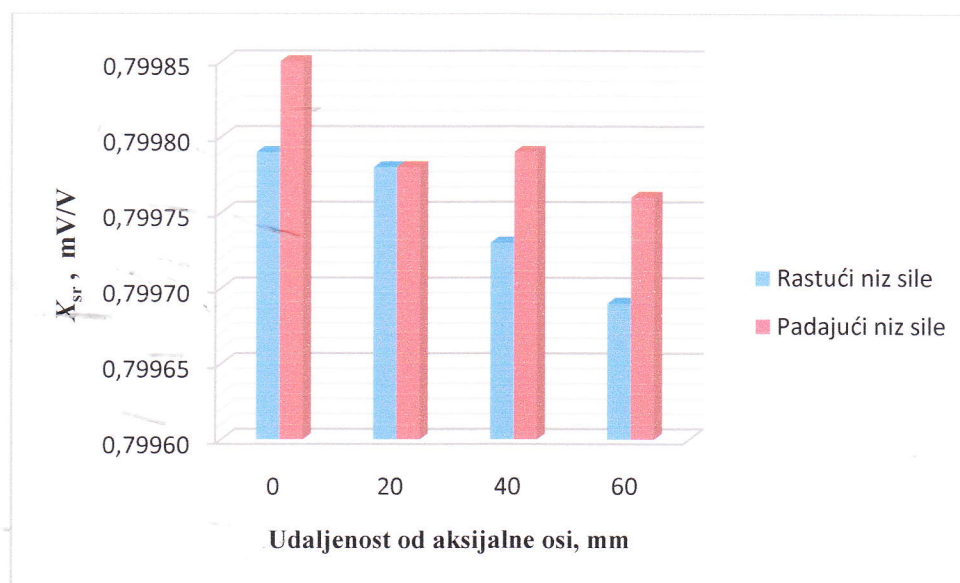
Slika 19: Srednja vrijednost mjernog signala pri 10 kN



Slika 20: Srednja vrijednost mjernog signala pri 20 kN

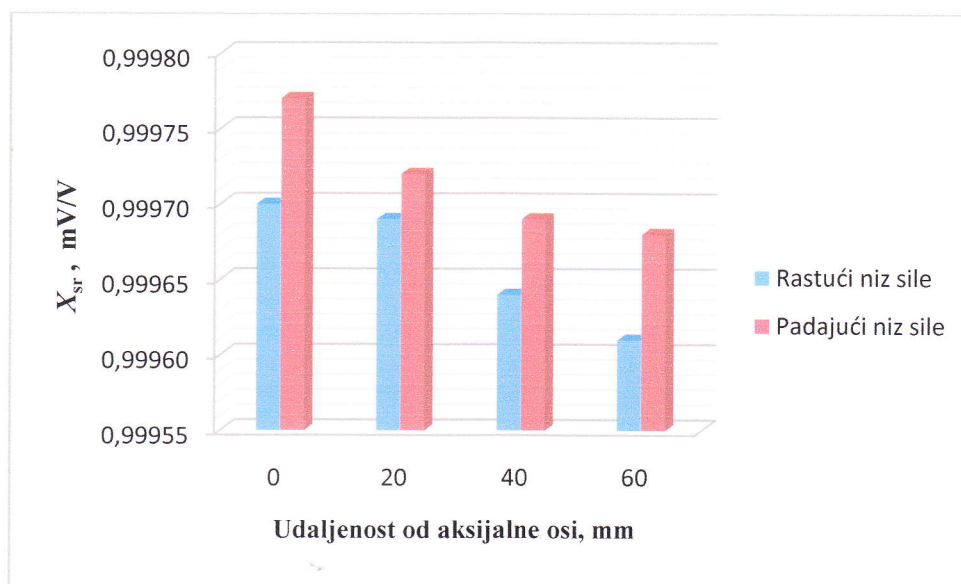


Slika 21: Srednja vrijednost mjernog signala pri 30 kN

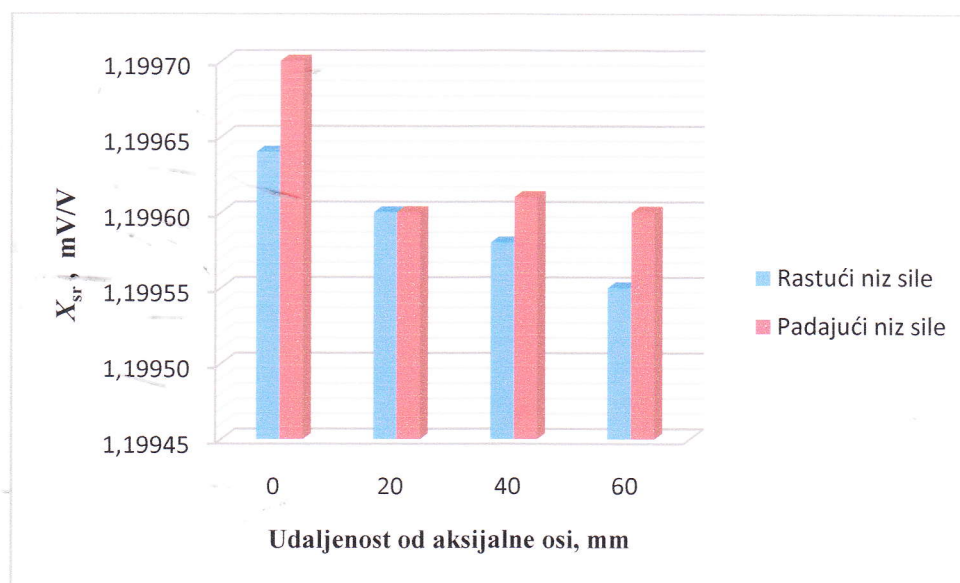


Slika 22: Srednja vrijednost mjernog signala pri 40 kN

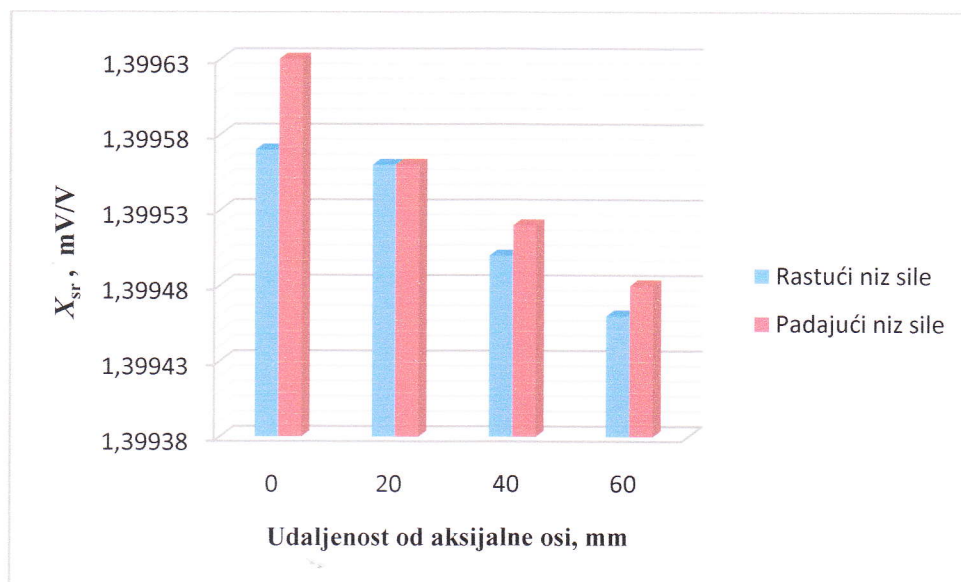




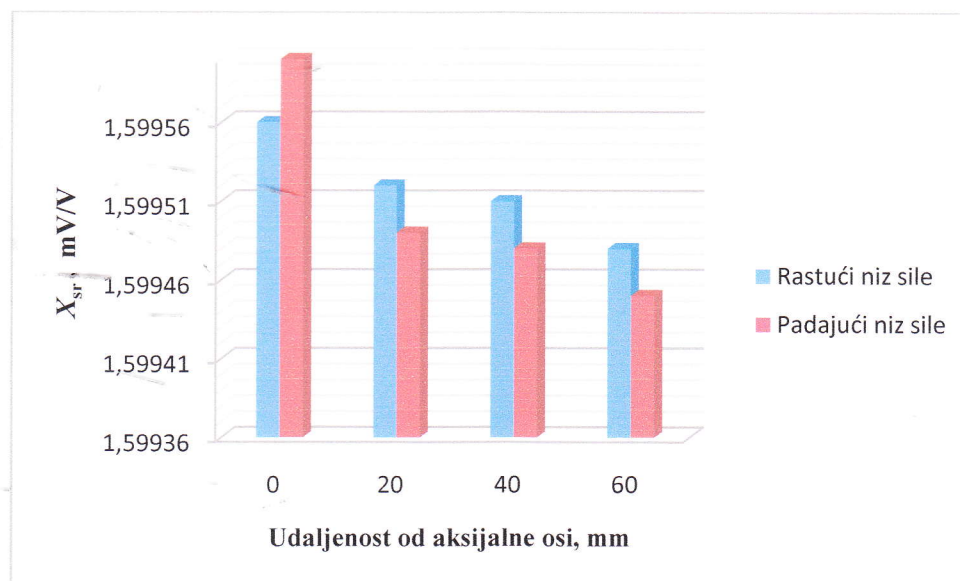
Slika 23: Srednja vrijednost mjernog signala pri 50 kN



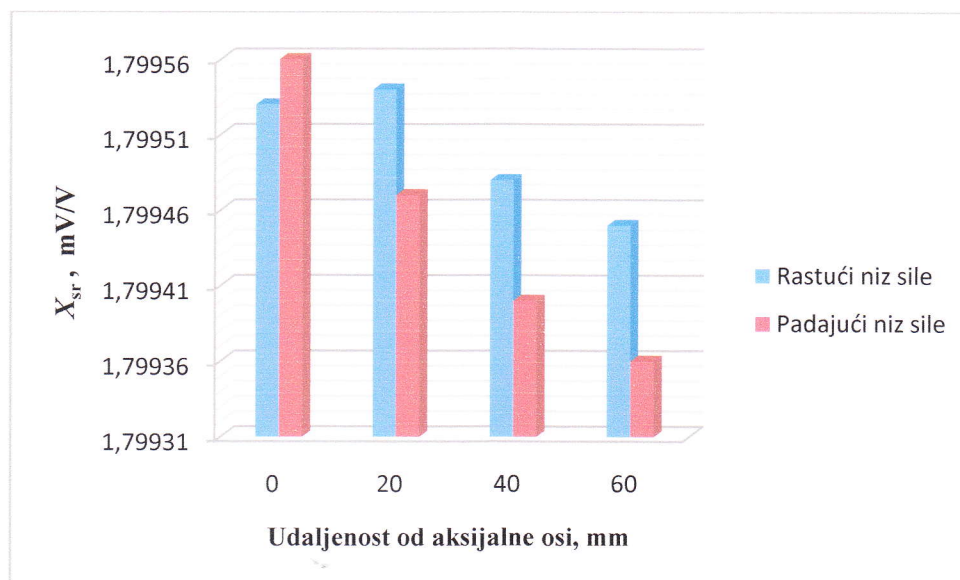
Slika 24: Srednja vrijednost mjernog signala pri 60 kN



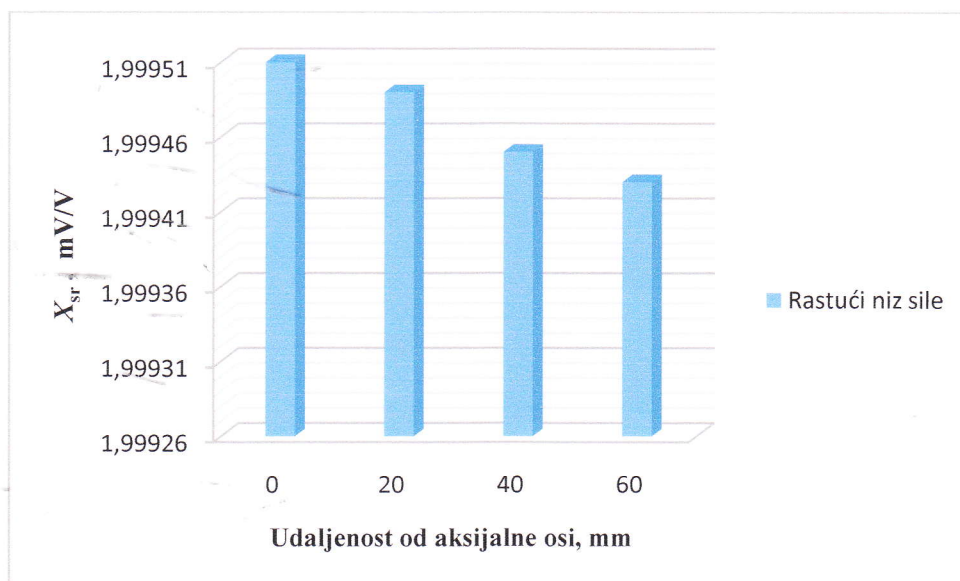
Slika 25: Srednja vrijednost mjernog signala pri 70 kN



Slika 26: Srednja vrijednost mjernog signala pri 80 kN



Slika 27: Srednja vrijednost mjernog signala pri 90 kN



Slika 28: Srednja vrijednost mjernog signala pri 100 kN

Iz slika 19 – 28 može se zaključiti da se izlazni signal za rastuće i za padajuće sile u principu smanjuje kako se povećava udaljenost od aksijalne osi opterećivanja i to na svim mjernim točkama. Isto tako vidljivo je da je vrijednost izlaznog signala za padajući niz sile veća od vrijednosti izlaznog signala za rastući niz sile i to pri svim mjernim točkama od 10 kN pa do 70 kN. Za mjerne točke 80 kN i 90 kN ovaj odnos je obrnut te su veće vrijednosti izmjerene u rastućem nizu.

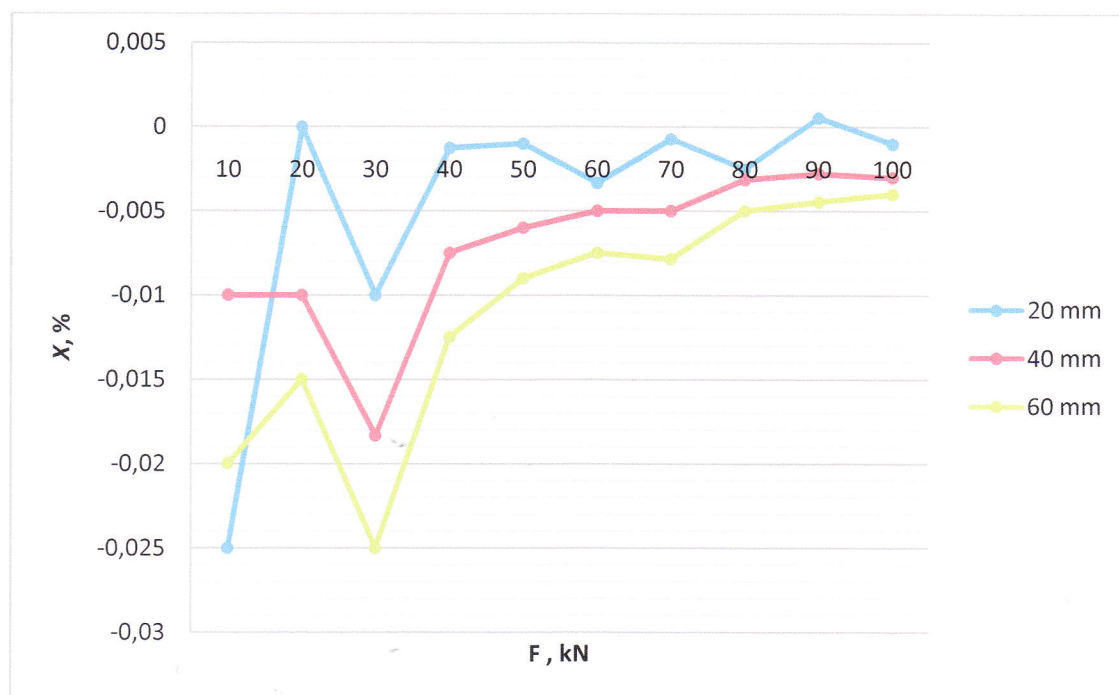


Izračunate vrijednosti relativne promjene signala pri rastućoj sili za mjerne točke od 10 kN do 100 kN za sve udaljenosti od aksijalne osi opterećivanja dani su u tablici 11.

Tablica 11: Vrijednosti relativne promjene signala pri rastućoj sili za različite udaljenosti od aksijalne osi opterećivanja

Udaljenost od aksijalne osi opterećivanja, mm	Sila, kN	X, %
20	10	-0,02499
	20	0,00000
	30	-0,01000
	40	-0,00125
	50	-0,00100
	60	-0,00333
	70	-0,00071
	80	-0,00250
	90	0,00055
	100	-0,00100
40	10	-0,00999
	20	-0,01000
	30	-0,01833
	40	-0,00750
	50	-0,00600
	60	-0,00500
	70	-0,00500
	80	-0,00312
	90	-0,00277
	100	-0,00300
60	10	-0,02000
	20	-0,01500
	30	-0,02500
	40	-0,01250
	50	-0,00900
	60	-0,00750
	70	-0,00786
	80	-0,00500
	90	-0,00445
	100	-0,00400

Ovisnost relativne promjene signala o sili za udaljenosti 20 mm, 40 mm i 60 mm od aksijalne osi opterećivanja prikazana je na slici 29 za rastući niz sile.



Slika 29: Relativna promjena mjernog signala pri rastućem nizu sila

Sa dijagrama se može uočiti da relativna promjena mjernog signala s obzirom na to kako sila raste ona se smanjuje, a s obzirom na udaljenosti te vrijednosti relativne promjene signala su većeg iznosa za veće udaljenosti od osi opterećivanja što vrijedi za sve točke umjeravanja osim prve 10 kN.

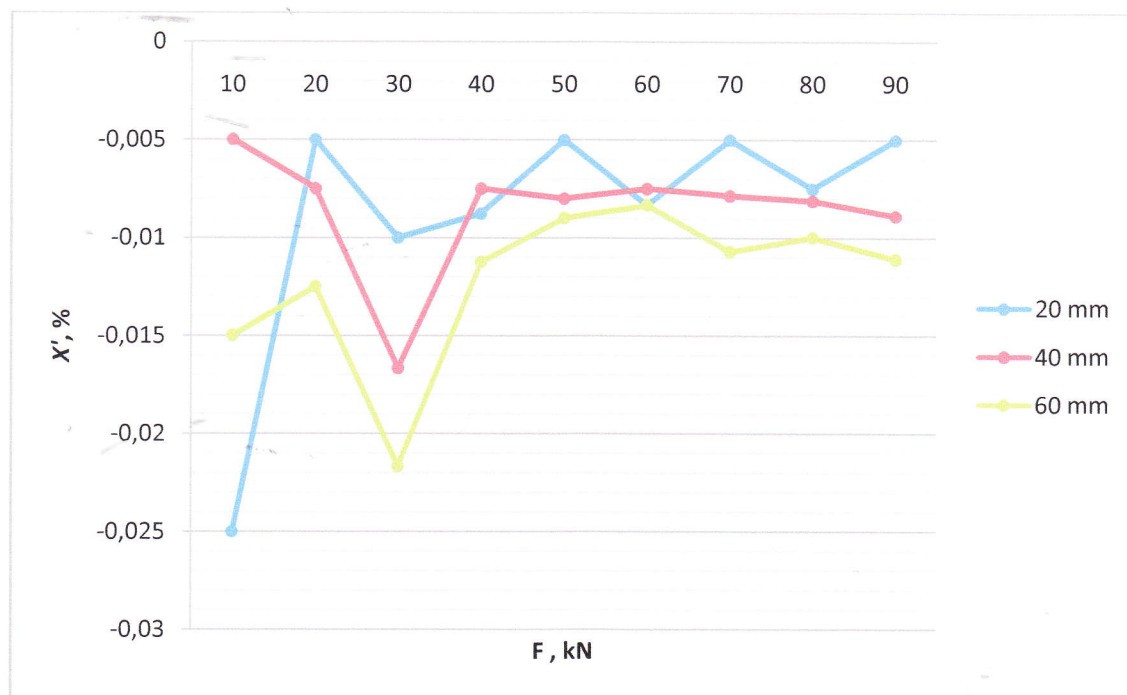
Izračunate vrijednosti relativne promjene signala za mjerne točke od 10 kN do 90 kN, padajući niz sila, za sve udaljenosti od centra opterećivanja dane su u tablici 12.

Tablica 12: Vrijednosti relativne promjene signala pri padajućoj sili za različite udaljenosti od aksijalne osi opterećivanja

Udaljenost od aksijalne osi opterećivanja, mm	Sila, kN	X', %
20	10	-0,02499
	20	-0,00499
	30	-0,01000
	40	-0,00875
	50	-0,005001
	60	-0,00833
	70	-0,00500
	80	-0,00750
	90	-0,005001

40	10	-0,00499
	20	-0,00749
	30	-0,01666
	40	-0,00750
	50	-0,00800
	60	-0,00750
	70	-0,00785
	80	-0,00812
	90	-0,00889
60	10	-0,01499
	20	-0,01250
	30	-0,02167
	40	-0,01125
	50	-0,00900
	60	-0,00834
	70	-0,01072
	80	-0,01000
	90	-0,01111

Ovisnost relativne promjene signala o sili za udaljenosti 20 mm, 40 mm i 60 mm od aksijalne osi opterećivanja prikazana je na slici 30 za padajući niz sile.



Slika 30: Relativna promjena mjernog signala pri padajućem nizu sile

Kod padajućeg niza sile sa dijagrama se može zaključiti da u mjernom području do 30 kN rasipanja vrijednosti relativne promjene signala su veća dok u ostalim mjernim točkama rasipanja su podjednaka.



## 6.4.2 Interpolacijska krivulja

Rezultati mjerenja ukazuju na vezu između primjenjene sile i očitane promjene napona, a ona se prikazuje polinomom 3. stupnja. Za dobivanje odgovarajućeg polinoma koristi se metoda najmanjih kvadrata koja dobro kompenzira neke nesavršenosti koje mogu utjecati na oblik interpolacijske krivulje.

Polinom 3. stupnja ili jednadžba umjeravanja glasi :

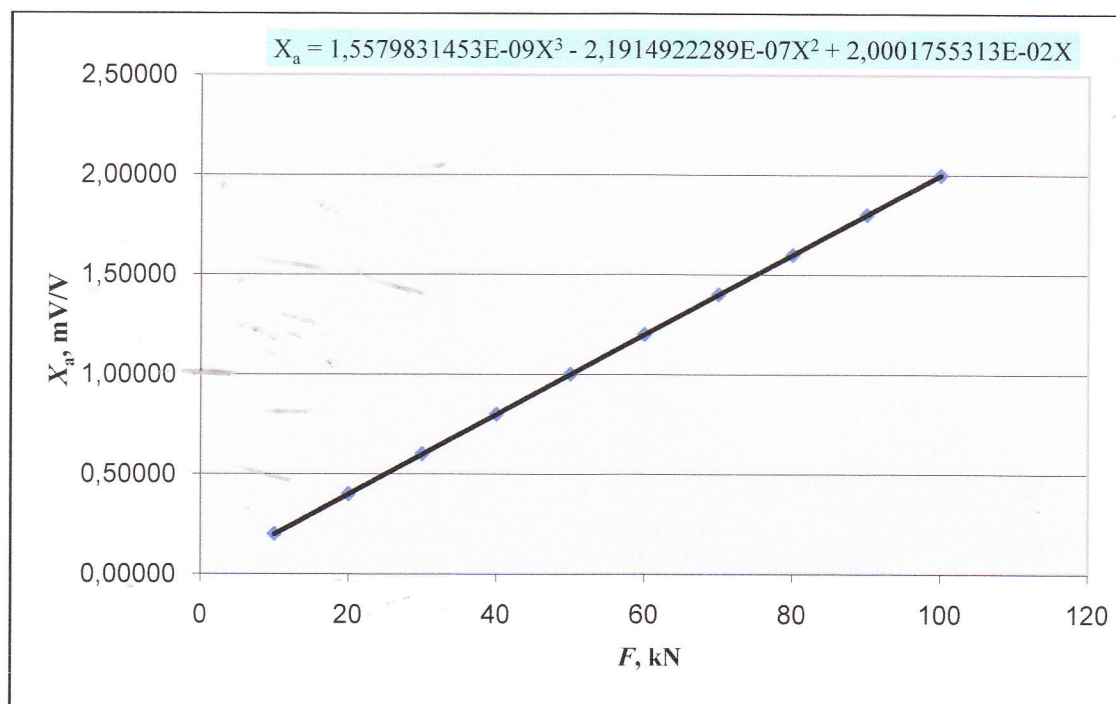
$$X_a = A \cdot X^3 + B \cdot X^2 + C \cdot X,$$

pri čemu je  $A = 1,5579831453E-09$

$$B = -2,1914922289E-07$$

$$C = 2,0001755313E-02.$$

Na slici 31 prikazan je rezultat umjeravanja etalona Z4A/100 kN u aksijalnoj osi opterećivanja polinomom 3. stupnja.



Slika 31: Prikaz rezultata umjeravanja etalona Z4A/100 kN u aksijalnoj osi opterećivanja polinomom 3. stupnja

U tablici 13 prikazane su interpolirane vrijednosti izlaznog signala za umjeravanja provedena u aksijalnoj osi opterećivanja i to za iznose sila od 10 kN do 100 kN. Navedene su i pripadajuće srednje vrijednosti očitavanja kod opterećivanja pri različitom položaju ( $\bar{X}_{r(1,3,5)}$ ). Na temelju danih vrijednosti izračunata je relativna interpolacijska greška  $f_c$  prema izrazu 5.5.

Tablica 13: Interpolirane vrijednosti i relativna interpolacijska greška za prijenosni etalon Z4A/100 kN u aksijalnoj osi opterećivanja

Sila, kN	$\bar{X}_r$ (1,3,5), mV/V	$X_a$ , mV/V	$f_c$ , %
10	0,20003	0,20000	0,01440
20	0,39996	0,39996	0,00019
30	0,59993	0,5999	0,00553
40	0,79979	0,79982	-0,00375
50	0,99971	0,99973	-0,00247
60	1,19965	1,19965	-0,00041
70	1,39957	1,39958	-0,00086
80	1,59957	1,59954	0,00228
90	1,79954	1,79952	0,00096
100	1,99952	1,99954	-0,00110

U tablici 14 prikazane su vrijednosti promjene izlaznog signala u mV/V dobivene interpolacijom polinomom 3. stupnja za sile u mjernom području od 10 do 100 kN s korakom od 1 kN.

Tablica 14: Interpolirane vrijednosti za prijenosni etalon Z4A/100 kN u aksijalnoj osi opterećivanja

Sila, kN	Interpolacija polinomom 3. stupnja, mV/V				
	0	1	2	3	4
10	0,20000	0,21999	0,23999	0,25999	0,27999
15	0,29998	0,31998	0,33997	0,35997	0,37996
20	0,39996	0,41995	0,43995	0,45994	0,47994
25	0,49993	0,51992	0,53992	0,55991	0,5799
30	0,5999	0,61989	0,63988	0,65988	0,67987
35	0,69986	0,71985	0,73984	0,75984	0,77983
40	0,79982	0,81981	0,8398	0,85979	0,87979
45	0,89978	0,91977	0,93976	0,95975	0,97974
50	0,99973	1,01973	1,03972	1,05971	1,0797
55	1,09969	1,11968	1,13968	1,15967	1,17966
60	1,19965	1,21965	1,23964	1,25963	1,27962
65	1,29962	1,31961	1,3396	1,3596	1,37959
70	1,39958	1,41958	1,43957	1,45957	1,47956
75	1,49956	1,51955	1,53955	1,55954	1,57954
80	1,59954	1,61953	1,63953	1,65953	1,67952
85	1,69952	1,71952	1,73952	1,75952	1,77952
90	1,79952	1,81952	1,83952	1,85952	1,87952
95	1,89952	1,91953	1,93953	1,95953	1,97954
100	1,99954	2,01955	2,03955	2,05956	2,07956

### 6.4.3. Kriteriji ocjenjivanja

Da bi se umjeravani prijenosni etalon mogao klasificirati iz rezultata mjerenja izračunati su kriteriji za klasifikaciju. U tablici 15 prikazana je vrijednost relativne greške nule ( $f_0$ ) za mjerne nizove  $X_1$ ,  $X_2$ ,  $X_{3/4}$  i  $X_{5/6}$ , dobiveno prema izrazu 5.6.

Tablica 15: Relativno odstupanje nul vrijednosti za prijenosni etalon Z4A/100 kN u aksijalnoj osi opterećivanja

Mjerni niz				
Relativna greška nul vrijednosti, $f_0$ , %	$X_1$	$X_2$	$X_{3/4'}$	$X_{5/6'}$
	0,0015	0,002	0,003	0,0025

U tablici 16 prikazani su iznosi ostalih kriterija: relativne greške ponovljivosti bez rotacije ( $b'$ ) prema izrazu 5.3, relativne greške obnovljivosti s rotacijom ( $b$ ) prema izrazu 5.1, relativne greške histereze ( $v$ ) prema izrazu 5.9 i relativne interpolacijske greške ( $f_c$ ) prema izrazu 5.5. Za svaki iznos sile od 10 do 100 kN s korakom od 10 kN dane su i srednje vrijednosti očitavanja ( $\bar{X}_{r(1-3-5)}$  i  $\bar{X}_{wr(1-2)}$ ) prema izrazima 5.2 i 5.4.

Tablica 16: Kriteriji za klasifikaciju prijenosnog etalona Z4A/100 kN u aksijalnoj osi opterećivanja

Sila, kN	$\bar{X}_{wr(1-2)}$ , mV/V	$\bar{X}_{r(1-3-5)}$ , mV/V	$b'$ , %	$b$ , %	$v$ , %	$f_c$ , %
10	0,20002	0,20003	-0,01	0,0000	0,0265	0,0144
20	0,39994	0,39996	-0,002	0,0055	0,0095	0,00019
30	0,59990	0,59993	0,00167	0,00833	0,00033	0,00553
40	0,79977	0,79979	0,0025	0,00775	0,00538	-0,00375
50	0,99969	0,99971	0,0000	0,004	0,0048	-0,00247
60	1,19961	1,19965	0,00083	0,006	0,003	-0,00041
70	1,39954	1,39957	0,00229	0,00657	0,00236	-0,00086
80	1,59953	1,59957	0,00125	0,00563	0,00094	0,00228
90	1,79949	1,79954	0,00111	0,00567	0,00006	0,00096
100	1,99947	1,99952	0,0006	0,0061		-0,0011



## 6.5 Analiza rezultata umjeravanja

Tablica 17 prikazuje kriterije ocjenjivanja potrebne za klasifikaciju prijenosnog etalona prema normi EN ISO 376. Vrijednosti tih kriterija izračunate su za sva četiri umjeravanja etalona, koji su na temelju istih svrstani u određenu klasu.

Tablica 17: Kriteriji ocjenjivanja i klasifikacija prijenosnog etalona Z4/100 kN u odnosu na udaljenosti od aksijalne osi opterećivanja

Udaljenost od aksijalne osi opterećivanja, mm	Sila, kN	$b'$ , %	$b$ , %	$v$ , %	$f_c$ , %	$f_0$ , %	Klasa	$U$ , %
0	10	-0,01	0	0,0265	0,0144		00	0,05508
	20	-0,002	0,0055	0,0095	0,00019		00	0,05081
	30	0,00167	0,00833	0,00033	0,00553		00	0,05056
	40	0,0025	0,00775	0,00538	-0,00375	0,003	00	0,05066
	50	0,0000	0,004	0,0048	-0,00247		00	0,05034
	60	0,00083	0,006	0,003	-0,00041		00	0,05036
	70	0,00229	0,00657	0,00236	-0,00086		00	0,05040
	80	0,00125	0,00563	0,00094	0,00228		00	0,05030
	90	0,00111	0,00567	0,00006	0,00096		00	0,05029
	100	0,0006	0,0061		-0,0011		00	0,05031
20	10	0,012	0,03801	0,04452	-0,00264		00	0,06762
	20	0,005	0,022	0,01826	0,0061		00	0,05499
	30	0,007	0,01934	0,01284	0,00079		00	0,05299
	40	0,005	0,01726	0,00675	-0,00049	0,0035	00	0,05200
	50	0,0042	0,01461	0,0086	-0,00072		00	0,05165
	60	0,00267	0,01317	0,00592	-0,00223		00	0,05126
	70	0,00214	0,01129	0,00479	0,00017		00	0,05103
	80	0,0025	0,00925	0,00194	0,00025		00	0,05066
	90	0,00167	0,011	0,00067	0,00221		00	0,05079
	100	0,0015	0,0103		-0,00127		00	0,05070
40	10	0,001	0,033	0,04651	0,02045		00	0,06604
	20	0,003	0,02901	0,02551	0,00444		00	0,05755
	30	0,00367	0,02768	0,01417	-0,00164		00	0,05483
	40	0,00375	0,02451	0,01438	-0,00127		00	0,05422
	50	0,0022	0,02381	0,01201	-0,00197	0,0030	00	0,05365
	60	0,0025	0,02234	0,00925	-0,00046		00	0,05301
	70	0,00157	0,02158	0,00679	-0,00113		00	0,05263
	80	0,00125	0,02188	0,00394	0,00219		00	0,05256
	90	0,00122	0,02279	0,00117	0,00121		00	0,05267
	100	0,0015	0,02211		-0,0012		00	0,05251

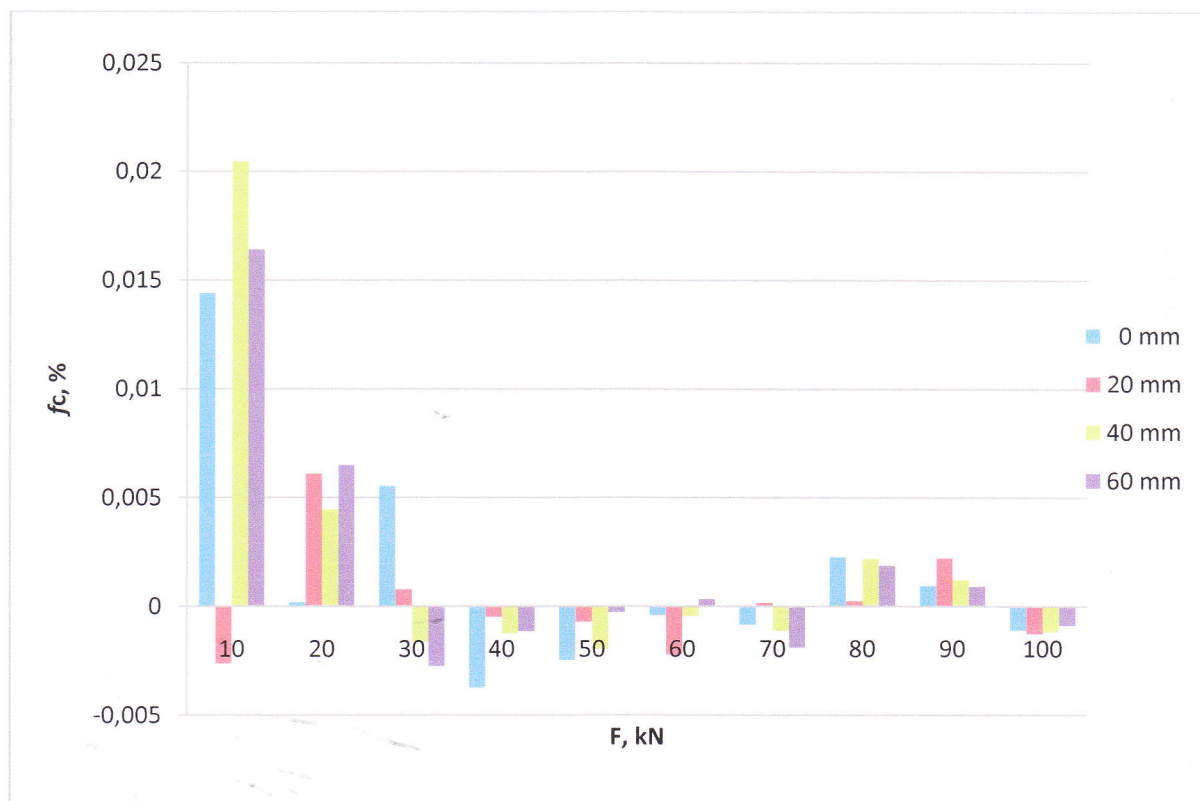
60	10	0,006	0,04301	0,04852	0,01641		00	0,07028
	20	0	0,04051	0,02601	0,00649		00	0,06076
	30	0,002	0,03835	0,01718	-0,00275		00	0,05853
	40	-	0,00125	0,03627	0,01776	-0,00115	00	0,05794
	50	-0,001	0,03622	0,01461	-0,00028		00	0,05733
	60	0,001	0,03635	0,01192	0,00034	0,0035	00	0,05702
	70	0,00086	0,03502	0,00793	-0,00189		00	0,05628
	80	-	0,00038	0,03576	0,00544	0,00188	00	0,05633
	90	-	0,00056	0,03612	0,00189	0,00092	00	0,05633
	100	0,0001	0,03601		-0,00089		00	0,05626

Analizom pojedinih parametara vidi se da prema normi EN ISO 376 prijenosni etalon za sve udaljenosti od aksijalne osi opterećivanja pripada klasi 00. Sve vrijednosti svih izračunatih kriterija nalaze se u intervalu dozvoljenih vrijednosti za ovu klasu (prema tablici 4), ali je vidljiva tendencija pogoršavanja tj. približavanja graničnim vrijednostima za klasu 00. Da se radilo o nekom lošijem dinamometru čije su vrijednosti grešaka već blizu graničnih očito da bi ovakvim izmicanjem dinamometra sigurno došlo do pogoršanja njegove klase tj. prijenosni etalon bi prešao u nižu klasu, a sve zbog nepravilno provedenog pozicioniranja.

Može se zaključiti da:

- prijenosni etalon Z4A/100 kN zadovoljava kriterije klase 00 u mjernom području od 10 do 100 kN u centru aksijalne osi opterećivanja,
- prijenosni etalon Z4A/100 kN zadovoljava kriterije klase 00 u mjernom području od 10 do 100 kN na udaljenosti od 20 mm od osi opterećivanja,
- prijenosni etalon Z4A/100 kN zadovoljava kriterije klase 00 u mjernom području od 10 do 100 kN na udaljenosti od 40 mm od osi opterećivanja,
- prijenosni etalon Z4A/100 kN zadovoljava kriterije klase 00 u mjernom području od 10 do 100 kN na udaljenosti od 60 mm od osi opterećivanja.

Slika 32 prikazuje relativnu interpolacijsku grešku u ovisnosti o sili, umjeravanog etalona, za različite udaljenosti od osi opterećivanja.

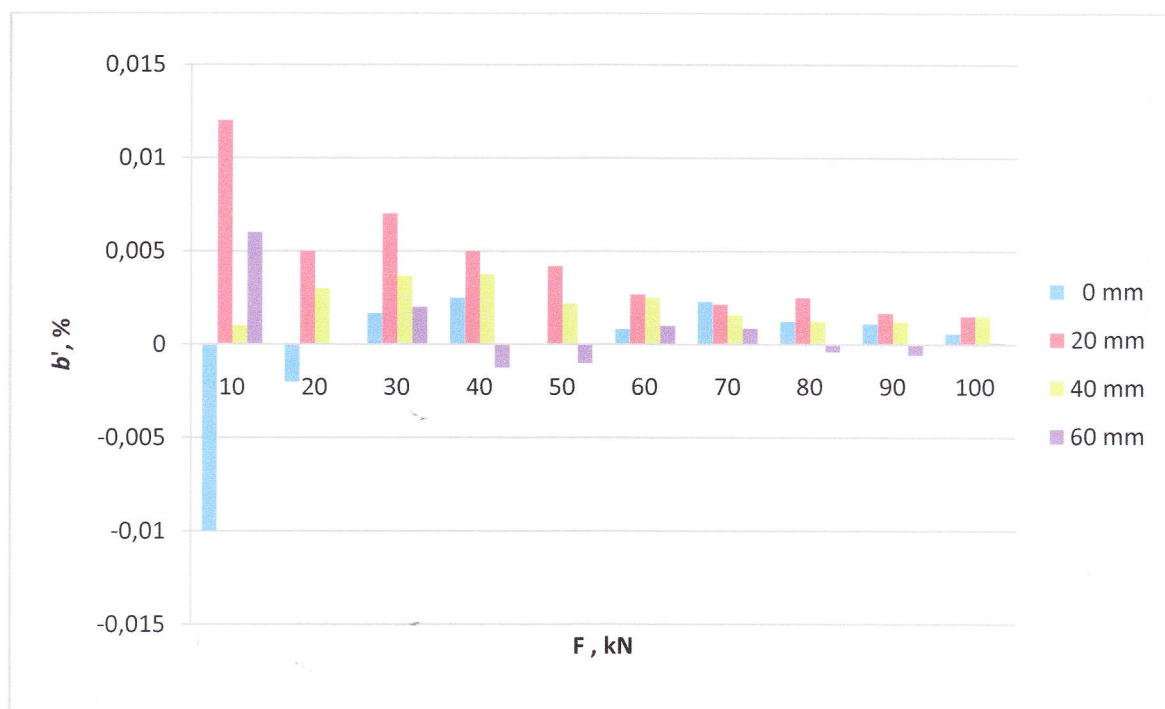


Slika 32: Relativna interpolacijska greška u ovisnosti o sili

Iz slike se može zaključiti da su vrijednosti relativne interpolacijske greške to manje što je veća sila dok ako se gleda promjena s obzirom na udaljenost dinamometra od osi opterećivanja ne može se zaključiti o nekakvom trendu promjene.

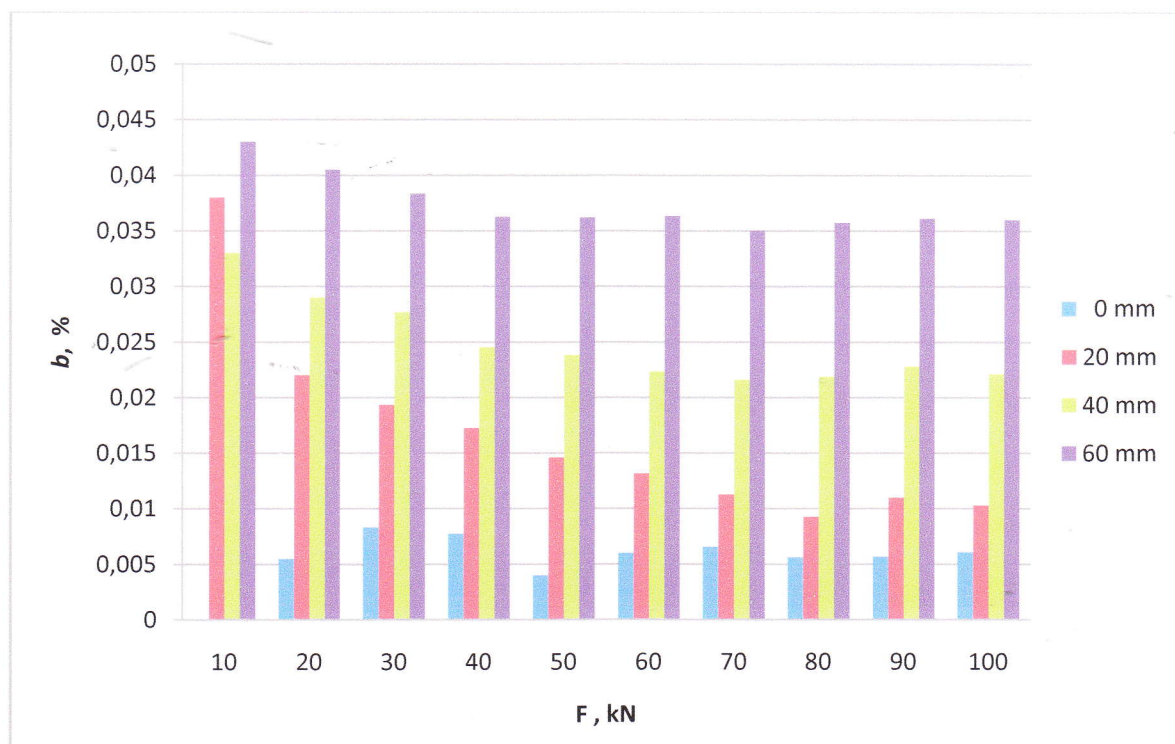


Iznosi izračunatih grešaka ovisno o iznosu sile prikazani su grafički na slikama 33, 34 i 35



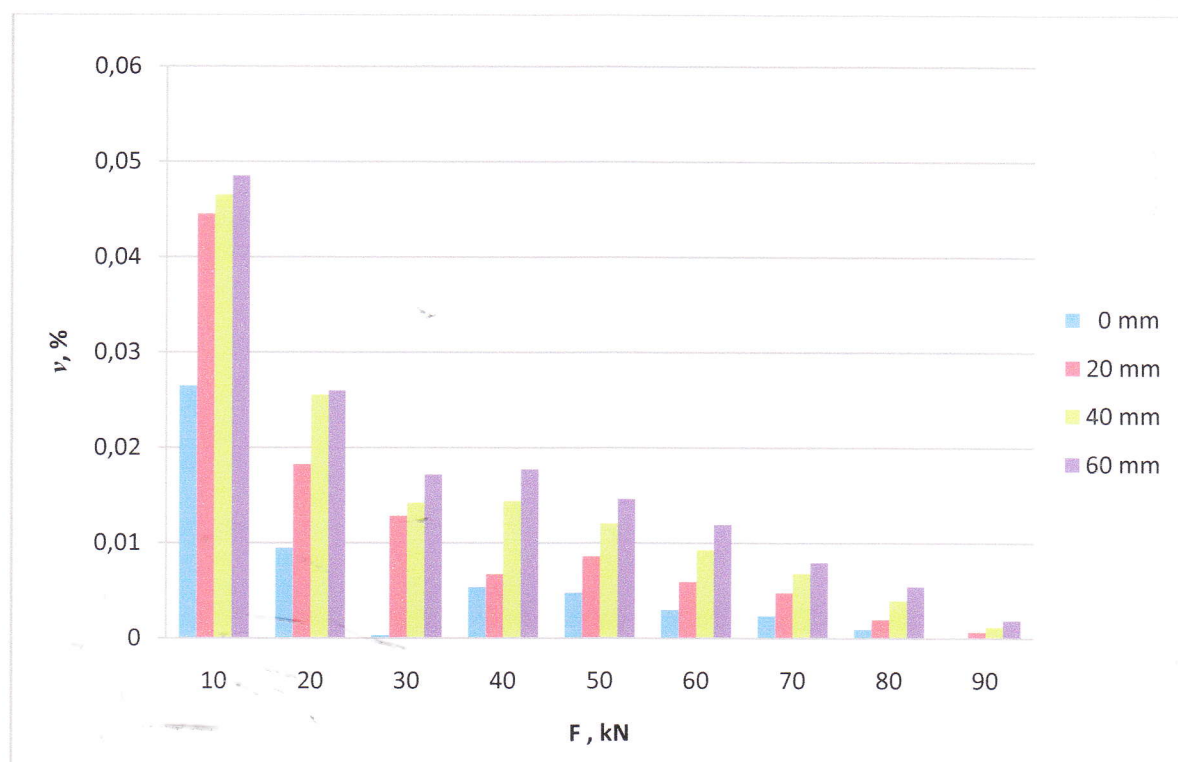
Slika 33: Relativna greška ponovljivosti bez rotacije u ovisnosti o sili

Iz grafičkog prikaza se može zaključiti da kako sila raste relativna greška ponovljivosti opada.



Slika 34: Relativna greška obnovljivosti s rotacijom u ovisnosti o sili

Sa slike 34 je vidljivo da se s porastom sile relativna greška obnovljivosti lagano smanjuje. Najveće smanjenje zabilježeno je kod umjeravanja na udaljenosti 20 mm od aksijalne osi opterećivanja. Ako se uspoređuju relativne greške ponovljivosti s obzirom na udaljenosti od aksijalne osi vidi se da je razlika između dobivenih vrijednosti značajna, tj. greška raste kako se udaljavamo od osi opterećivanja.



Slika 35: Relativna greška histereze u ovisnosti o sili

Kod relativne greške histereze grafički prikaz ukazuje na to, da se greška postepeno smanjuje porastom sile što vrijedi za sve razmatrane udaljenosti. Vidljivo je da kako se udaljavamo od centra aksijalne osi ta greška je postepeno raste.

## 5. ZAKLJUČAK

U ovom radu provedeno je umjeravanje prijenosnog etalona sile gdje se za različite udaljenosti (0 mm, 20 mm, 40 mm, 60 mm) od aksijalne osi opterećivanja analizira promjena vrijednosti karakterističnih grešaka dinamometra. Može se zaključiti da se njegovim udaljavanjem od aksijalne osi opterećivanja vrijednosti grešaka povećavaju. To se ponajprije odnosi na grešku obnovljivosti koja se povećala za približno 0,04% na svim mjernim točkama te u nešto manjoj mjeri i na grešku reverzibilnosti koja se povećala za otprilike 0,02% pri nižim vrijednostima sile. Ostale greške mijenjaju se tek neznatno odnosno nije jasno izražena tendencija njihove promjene.

Isto tako vidljivo je da su pri nižim mjernim točkama vrijednosti svih razmatranih grešaka veće i u principu se smanjuju kako se sila približava maksimalnoj sili umjeravanja.

Analizom grešaka po mjernim točkama za različite udaljenosti od aksijalne osi opterećivanja očito je da veličine grešaka ne prelaze vrijednosti navedene za klasu 00, ali se može uočiti da se neke greške približavaju graničnim vrijednostima (greška obnovljivosti, greška reverzibilnosti).

Razmatranjem vrijednosti mjernog signala po mjernim točkama generalno proizlazi da se njegova vrijednost smanjuje kako se dinamometar udaljava od aksijalne osi opterećivanja. Ovo smanjenje izraženo je i kod rastuće i kod padajuće sile, ali treba istaknuti da su u najvećem dijelu mjernog područja sve do 70 kn vrijednosti izmjerene u padajućem nizu veće od onih izmjerenih u rastućem nizu.



## 8. LITERATURA

- [1] [http://www.fsb.hr/atlantis/upload/newsboard/17\\_06\\_2008\\_\\_9070\\_DOKTORAT\\_Alar.pdf](http://www.fsb.hr/atlantis/upload/newsboard/17_06_2008__9070_DOKTORAT_Alar.pdf)
- [2] [http://en.wikipedia.org/wiki/Force#Newton.27s\\_first\\_law](http://en.wikipedia.org/wiki/Force#Newton.27s_first_law)
- [3] [fizika.fpz.hr/download/10%20%20FIZIKA%2081%20-%2090.pdf](http://fizika.fpz.hr/download/10%20%20FIZIKA%2081%20-%2090.pdf)
- [4] M. Franz: Mehanička svojstva materijala, FSB, Zagreb, 1998.
- [5] Ž. Alar, M. Franz, Analiza promjena karakteristika prijenosnog etalona sile Z4 – 20 kN tijekom eksploatacije
- [6] [http://www.act.rasip.fer.hr/materijali/9/PM\\_vjezba\\_5.pdf](http://www.act.rasip.fer.hr/materijali/9/PM_vjezba_5.pdf)
- [7] S. Mahović: Teorija i tehnika mjerenja, podloge za predavanja, FSB, ak.god. 2006/2007.
- [8] Ž. Alar, M. Franz, Mjerna sljedivost opreme za mjerenje sile u R. Hrvatskoj
- [9] <http://www.hrcak.srce.hr/file/2488>
- [10] [http://www.fsb.hr/zavod\\_za\\_materijale/html/index.php](http://www.fsb.hr/zavod_za_materijale/html/index.php)
- [11] [http://www.dzm.hr/\\_download/repository/ea-4-07-preradjena-paginacija.pdf](http://www.dzm.hr/_download/repository/ea-4-07-preradjena-paginacija.pdf)
- [12] <http://www.ptb.de>
- [13] <http://www.trepro.co.yu/Serbian/Software.htm>
- [14] Ž. Alar, M. Franz, Akreditacija LIMS-a za umjeravanje mjerila sile
- [15] <http://www.unze.ba/am/ip/19%20Mjerne%20trake.pdf>
- [16] ISO 376: Metallic materials – Calibration of force – proving instruments used for the verification of uniaxial testing machines, 2004.

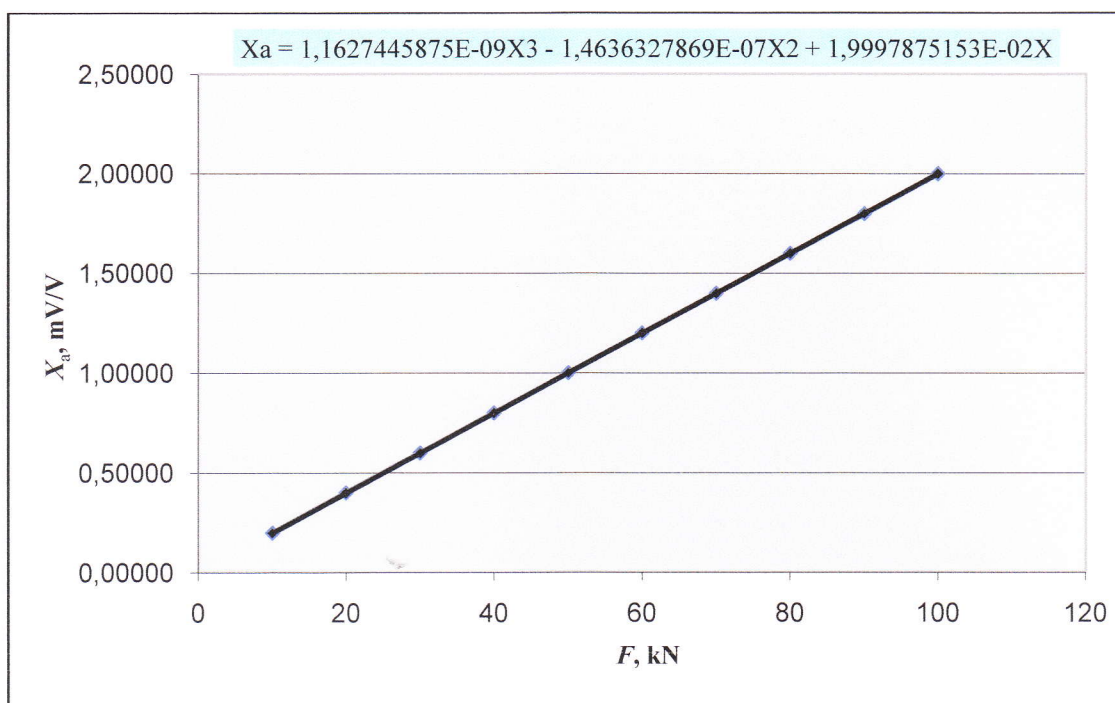
## PRILOG I: Rezultati umjeravanja prijenosnog etalona Z4A/100 kN na udaljenosti 20 mm od aksijalne osi opterećivanja

Tablica 18 : Izmjerene vrijednosti i vrijednosti relativne greške nule kod predopterećenja za prijenosni etalon Z4A/100 kN na udaljenosti 20 mm od aksijalne osi opterećivanja

	0°	120°	240°
Očitavanje kod nazivne vrijednosti, mV/V	1,99916	1,99938	1,99942
Očitavanje nakon rasterećenja, mV/V	0,00004	0,00001	0,00001
Vrijednost relativne greške nule kod predopterećenja, mV/V	0,002	0,0005	0,0005

Tablica 19: Rezultata umjeravanja za prijenosni etalon Z4A/100 kN na udaljenosti 20 mm od aksijalne osi opterećivanja

Sila, kN	Isti ugradbeni položaj		Različiti ugradbeni položaj			
	$X_1$ , mV/V	$X_2$ , mV/V	$X_3$ , mV/V	$X_4'$ , mV/V	$X_5$ , mV/V	$X_6'$ , mV/V
0	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000
10	0,19999	0,20002	0,19992	0,20002	0,19997	0,20005
20	0,39997	0,39999	0,39988	0,39997	0,39995	0,40001
30	0,59989	0,59993	0,59977	0,59985	0,59986	0,59994
40	0,79981	0,79985	0,79967	0,79972	0,79977	0,79983
50	0,99973	0,99977	0,99958	0,99967	0,99968	0,99977
60	1,19964	1,19967	1,19948	1,19955	1,19958	1,19966
70	1,39961	1,39964	1,39946	1,3995	1,39954	1,39963
80	1,59956	1,5996	1,59942	1,59943	1,5995	1,59955
90	1,79961	1,79964	1,79941	1,79941	1,79952	1,79954
100	1,99956	1,99959	1,99935	-	1,99948	-
0	0,00004	0,00005	-	0,00007	-	0,00006



Slika 36: Prikaz rezultata umjeravanja etalona Z4A/100 kN na udaljenosti 20 mm od aksijalne osi opterećivanja polinomom 3. stupnja

$$X_a = A \cdot X^3 + B \cdot X^2 + C \cdot X,$$

$$A = 1,1627445875E-09$$

$$B = -1,4636327869E-07$$

$$C = 1,9997875153E-02$$

Tablica 20: Interpolirane vrijednosti i relativna interpolacijska greška za prijenosni etalon Z4/100 kN na udaljenosti 20 mm od aksijalne osi opterećivanja

Sila, kN	$\bar{X}_r$ (1,3,5), mV/V	$X_a$ , mV/V	$f_c$ , %
10	0,19996	0,19997	-0,00264
20	0,39993	0,39991	0,0061
30	0,59984	0,59984	0,00079
40	0,79975	0,79976	-0,00049
50	0,99967	0,99967	-0,00072
60	1,19957	1,19960	-0,00223
70	1,39954	1,39953	0,00017
80	1,59949	1,59949	0,00025
90	1,79951	1,79947	0,00221
100	1,99946	1,99949	-0,00127



Tablica 21: Interpolirane vrijednosti za prijenosni etalon Z4A/100 kN na udaljenosti 20 mm od aksijalne osi opterećivanja

Sila	Interpolacija polinomom 3. stupnja, mV/V				
	0	1	2	3	4
10	0,19997	0,21996	0,23996	0,25995	0,27994
15	0,29994	0,31993	0,33993	0,35992	0,37991
20	0,39991	0,41990	0,43989	0,45989	0,47988
25	0,49987	0,51987	0,53986	0,55985	0,57984
30	0,59984	0,61983	0,63982	0,65981	0,67980
35	0,69980	0,71979	0,73978	0,75977	0,77976
40	0,79976	0,81975	0,83974	0,85973	0,87972
45	0,89971	0,91971	0,93970	0,95969	0,97968
50	0,99967	1,01967	1,03966	1,05965	1,07964
55	1,09963	1,11963	1,13962	1,15961	1,17960
60	1,19960	1,21959	1,23958	1,25958	1,27957
65	1,29956	1,31956	1,33955	1,35954	1,37954
70	1,39953	1,41953	1,43952	1,45952	1,47951
75	1,49951	1,51950	1,53950	1,55950	1,57949
80	1,59949	1,61949	1,63948	1,65948	1,67948
85	1,69948	1,71947	1,73947	1,75947	1,77947
90	1,79947	1,81947	1,83947	1,85947	1,87947
95	1,89947	1,91948	1,93948	1,95948	1,97948
100	1,99949	2,01949	2,03949	2,05950	2,07950

Tablica 22 : Vrijednosti relativne greške nule za prijenosni etalon Z4A/100 kN na udaljenosti 20 mm od aksijalne osi opterećivanja

Relativna greška nul vrijednosti, $f_0$ , %	Mjerni niz			
	$X_1$	$X_2$	$X_{3/4}'$	$X_{5/6}'$
	0,002	0,0025	0,0035	0,003

Tablica 23: Kriteriji za klasifikaciju prijenosnog etalona Z4A/100 kN na udaljenosti 20 mm od aksijalne osi opterećivanja

Sila, kN	$\bar{X}_{wr} \text{ (1-2),}$ mV/V	$\bar{X}_r \text{ (1-3-5),}$ mV/V	$b', \%$	$b, \%$	$v, \%$	$f_c, \%$
10	0,20001	0,19996	0,012	0,03801	0,04452	-0,00264
20	0,39998	0,39993	0,005	0,022	0,01826	0,0061
30	0,59991	0,59984	0,007	0,01934	0,01284	0,00079
40	0,79983	0,79975	0,005	0,01726	0,00675	-0,00049
50	0,99975	0,99967	0,0042	0,01461	0,0086	-0,00072
60	1,19966	1,19957	0,00267	0,01317	0,00592	-0,00223
70	1,39963	1,39954	0,00214	0,01129	0,00479	0,00017
80	1,59958	1,59949	0,0025	0,00925	0,00194	0,00025
90	1,79962	1,79951	0,00167	0,011	0,00067	0,00221
100	1,99957	1,99946	0,0015	0,0103		-0,00127

## PRILOG II: Rezultati umjeravanja prijenosnog etalona Z4A/100 kN na udaljenosti 40 mm od aksijalne osi opterećenja

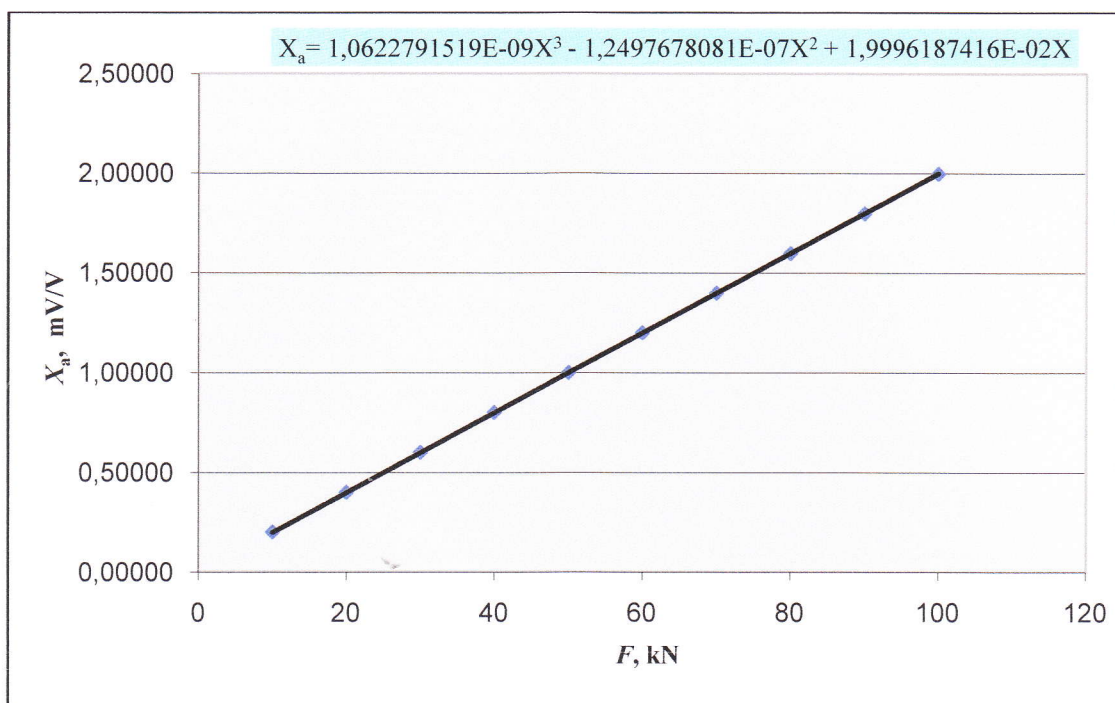
Tablica 24: Izmjerene vrijednosti i relativna odstupanja nul vrijednosti kod predopterećenja za prijenosni etalon Z4A/100 kN na udaljenosti 40 mm od aksijalne osi opterećivanja

	0°	120°	240°
Očitavanje kod nazivne vrijednosti, mV/V	1,99884	1,99943	1,99946
Očitavanje nakon rasterećenja, mV/V	0,00003	0,00001	0,00003
Vrijednost relativne greške nule kod predopterećenja, mV/V	0,0015	0,0005	0,0015

Tablica 25: Rezultati umjeravanja na udaljenosti 40 mm od aksijalne osi opterećivanja

Sila, kN	Isti ugradbeni položaj			Različiti ugradbeni položaj		
	$X_1$ , mV/V	$X_2$ , mV/V	$X_3$ , mV/V	$X_4'$ , mV/V	$X_5$ , mV/V	$X_6'$ , mV/V
0	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000
10	0,20002	0,20002	0,19995	0,20005	0,2	0,20009
20	0,39994	0,39995	0,39982	0,39993	0,39994	0,40003
30	0,59985	0,59987	0,59969	0,59977	0,59984	0,59992
40	0,79977	0,7998	0,79958	0,7997	0,79977	0,79987
50	0,99969	0,99972	0,99946	0,99958	0,99968	0,99979
60	1,19964	1,19967	1,19937	1,19948	1,19963	1,19974
70	1,39957	1,39959	1,39927	1,39937	1,39957	1,39967
80	1,59959	1,59961	1,59924	1,59931	1,59959	1,59965
90	1,79957	1,79959	1,79917	1,7992	1,79958	1,7996
100	1,99953	1,99956	1,99912	-	1,99957	-
0	0,00005	0,00005	-	0,00006	-	0,00006





Slika 37 : Prikaz rezultata umjeravanja etalona Z4A/100 kN na udaljenosti 40 mm od aksijalne osi opterećivanja polinomom 3. stupnja

$$X_a = A \cdot X^3 + B \cdot X^2 + C \cdot X,$$

$$A = 1,0622791519E-09$$

$$B = -1,2497678081E-07$$

$$C = 1,9996187416E-02$$

Tablica 26: Interpolirane vrijednosti i relativna interpolacijska greška za prijenosni etalon Z4/100 kN na udaljenosti 40 mm od aksijalne osi opterećivanja

Sila, kN	$\bar{X}_r (1,3,5), \text{mV/V}$	$X_a, \text{mV/V}$	$f_c, \%$
10	0,19999	0,19995	0,02045
20	0,39990	0,39988	0,00444
30	0,59979	0,5998	-0,00164
40	0,79971	0,79972	-0,00127
50	0,99961	0,99963	-0,00197
60	1,19955	1,19955	-0,00046
70	1,39947	1,39949	-0,00113
80	1,59947	1,59944	0,00219
90	1,79944	1,79942	0,00121
100	1,99941	1,99943	-0,0012

Tablica 27: Interpolirane vrijednosti za prijenosni etalon Z4A/100 kN na udaljenosti 40 mm od aksijalne osi opterećivanja

Sila	Interpolacija polinomom 3. stupnja, mV/V				
	0	1	2	3	4
10	0,19995	0,21994	0,23994	0,25993	0,27993
15	0,29992	0,31991	0,3399	0,3599	0,37989
20	0,39988	0,41987	0,43987	0,45986	0,47985
25	0,49984	0,51984	0,53983	0,55982	0,57981
30	0,5998	0,61979	0,63978	0,65978	0,67977
35	0,69976	0,71975	0,73974	0,75973	0,77972
40	0,79972	0,81971	0,8397	0,85969	0,87968
45	0,89967	0,91966	0,93966	0,95965	0,97964
50	0,99963	1,01962	1,03961	1,05961	1,0796
55	1,09959	1,11958	1,13957	1,15957	1,17956
60	1,19955	1,21954	1,23954	1,25953	1,27952
65	1,29952	1,31951	1,3395	1,3595	1,37949
70	1,39949	1,41948	1,43947	1,45947	1,47946
75	1,49946	1,51945	1,53945	1,55945	1,57944
80	1,59944	1,61944	1,63943	1,65943	1,67943
85	1,69943	1,71942	1,73942	1,75942	1,77942
90	1,79942	1,81942	1,83942	1,85942	1,87942
95	1,89942	1,91942	1,93942	1,95943	1,97943
100	1,99943	2,01943	2,03944	2,05944	2,07945

Tablica 28: Vrijednosti relativne greške nule za prijenosni etalon Z4A/100 kN na udaljenosti 40 mm od aksijalne osi opterećivanja

Mjerni niz				
Relativna greška nul vrijednosti, $f_0$ , %	$X_1$	$X_2$	$X_{3/4}'$	$X_{5/6}'$
	0,0025	0,0025	0,0030	0,0030

Tablica 29: Kriteriji za klasifikaciju prijenosnog etalona Z4A/100 kN na udaljenosti 40 mm od aksijalne osi opterećivanja

Sila, kN	$\bar{X}_{wr (1-2)}, \text{ mV/V}$	$\bar{X}_r (1-3-5), \text{ mV/V}$	$b', \%$	$b, \%$	$v, \%$	$f_c, \%$
10	0,20002	0,19999	0,001	0,033	0,04651	0,02045
20	0,39995	0,39990	0,003	0,02901	0,02551	0,00444
30	0,59986	0,59979	0,00367	0,02768	0,01417	-0,00164
40	0,79979	0,79971	0,00375	0,02451	0,01438	-0,00127
50	0,99970	0,99961	0,0022	0,02381	0,01201	-0,00197
60	1,19965	1,19955	0,0025	0,02234	0,00925	-0,00046
70	1,39958	1,39947	0,00157	0,02158	0,00679	-0,00113
80	1,59960	1,59947	0,00125	0,02188	0,00394	0,00219
90	1,79958	1,79944	0,00122	0,02279	0,00117	0,00121
100	1,99955	1,99941	0,0015	0,02211		-0,0012



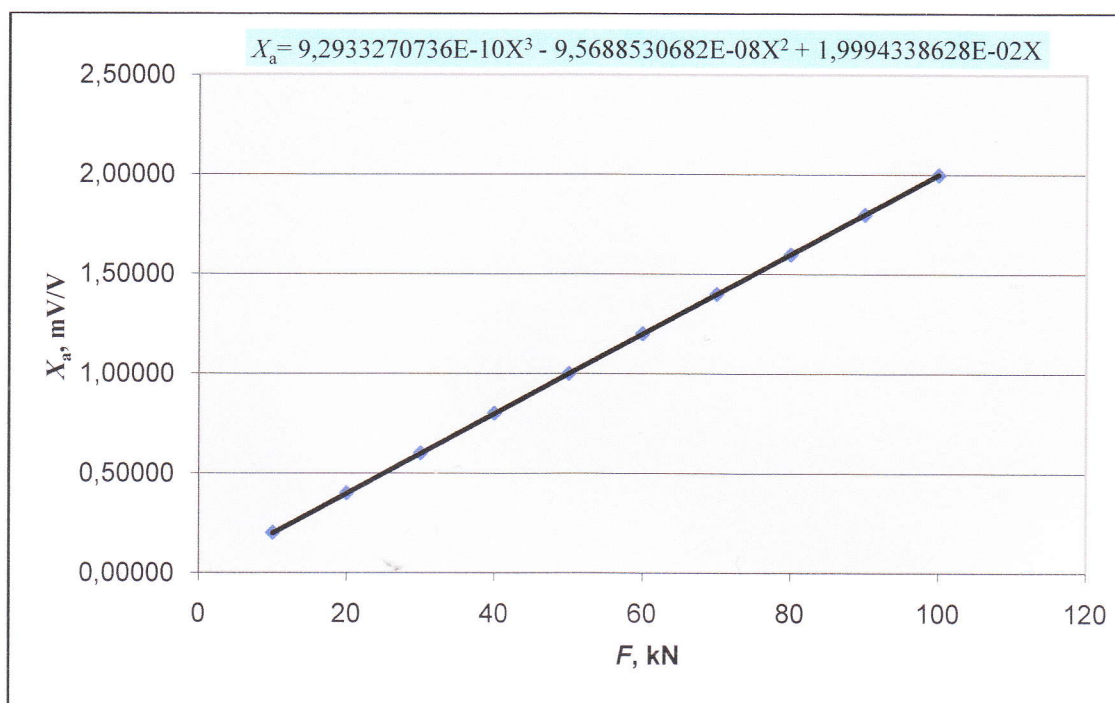
### PRILOG III: Rezultati umjeravanja prijenosnog etalona Z4A/100 kN na udaljenosti 60 mm od aksijalne osi opterećenja

Tablica 30: Izmjerene vrijednosti i vrijednosti relativne greške nule kod predopterećenja za prijenosni etalon Z4A/100 kN na udaljenosti 60 mm od aksijalne osi opterećivanja

	0°	120°	240°
Očitavanje kod nazivne vrijednosti, mV/V	1,99873	1,99952	1,9995
Očitavanje nakon rasterećenja, mV/V	0,00007	0,00004	0,00003
Vrijednost relativne greške nule kod predopterećenja, mV/V	0,0035	0,0020	0,0015

Tablica 31: Rezultata umjeravanja za prijenosni etalon Z4A/100 kN na udaljenosti 60 mm od aksijalne osi opterećenja

Sila, kN	Isti ugradbeni položaj		Različiti ugradbeni položaj			
	$X_1$ , mV/V	$X_2$ , mV/V	$X_3$ , mV/V	$X_4'$ , mV/V	$X_5$ , mV/V	$X_6'$ , mV/V
0	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000
10	0,2	0,20001	0,19991	0,20002	0,19999	0,20008
20	0,39993	0,39993	0,39977	0,39988	0,39993	0,40004
30	0,59981	0,59982	0,5996	0,59971	0,59983	0,59993
40	0,79976	0,79975	0,79948	0,79961	0,79977	0,79992
50	0,99969	0,99968	0,99936	0,9995	0,99972	0,99987
60	1,19964	1,19965	1,19924	1,19939	1,19968	1,19982
70	1,39955	1,39956	1,39912	1,39922	1,39961	1,39973
80	1,59959	1,59958	1,59908	1,59917	1,59965	1,59974
90	1,79957	1,79956	1,799	1,79904	1,79965	1,79968
100	1,99955	1,99955	1,99895	-	1,99967	-
0	0,00005	0,00006	-	0,00007	-	0,00007



Slika 38: Prikaz rezultata umjeravanja etalona Z4A/100 kN na udaljenosti 60 mm od aksijalne osi opterećenja polinomom 3. stupnja

$$X_a = A * X^3 + B * X^2 + C * X,$$

$$A = 9,2933270736E-10$$

$$B = -9,5688530682E-07$$

$$C = 1,9994338628E-02$$

Tablica 32: Interpolirane vrijednosti i relativna interpolacijska greška za prijenosni etalon Z4A/100 kN na udaljenosti 60 mm od aksijalne osi opterećenja

Sila, kN	$\bar{X}_r (1,3,5)$ , mV/V	$X_a$ , mV/V	$f_c$ , %
10	0,19997	0,19993	0,01641
20	0,39988	0,39985	0,00649
30	0,59975	0,59976	-0,00275
40	0,79967	0,79967	-0,00115
50	0,99959	0,99958	-0,00028
60	1,19952	1,1995	0,00034
70	1,39943	1,39943	-0,00189
80	1,59944	1,59939	0,00188
90	1,79941	1,79937	0,00092
100	1,99939	1,99938	-0,00089

Tablica 33: Interpolirane vrijednosti za prijenosni etalon Z4A/100 kN na udaljenosti 60 mm od aksijalne osi opterećenja

Sila	Interpolacija polinomom 3. stupnja, mV/V				
	0	1	2	3	4
10	0,19993	0,21992	0,23992	0,25991	0,27990
15	0,29989	0,31988	0,33988	0,35987	0,37986
20	0,39985	0,41984	0,43983	0,45982	0,47981
25	0,49981	0,51980	0,53979	0,55978	0,57977
30	0,59976	0,61975	0,63974	0,65973	0,67972
35	0,69971	0,71971	0,73970	0,75969	0,77968
40	0,79967	0,81966	0,83965	0,85964	0,87963
45	0,89962	0,91961	0,93961	0,95960	0,97959
50	0,99958	1,01957	1,03956	1,05955	1,07955
55	1,09954	1,11953	1,13952	1,15951	1,17951
60	1,19950	1,21949	1,23948	1,25948	1,27947
65	1,29946	1,31946	1,33945	1,35945	1,37944
70	1,39943	1,41943	1,43942	1,45942	1,47941
75	1,49941	1,51940	1,53940	1,55939	1,57939
80	1,59939	1,61938	1,63938	1,65938	1,67938
85	1,69937	1,71937	1,73937	1,75937	1,77937
90	1,79937	1,81937	1,83937	1,85937	1,87937
95	1,89937	1,91937	1,93937	1,95937	1,97937
100	1,99938	2,01938	2,03938	2,05939	2,07939

Tablica 34: Vrijednosti relativne greške nule za prijenosni etalon Z4A/100 kN na udaljenosti 60 mm od aksijalne osi opterećenja

Relativa greška nul vrijednosti, $f_0$ , %	Mjerni niz			
	$X_1$	$X_2$	$X_{3/4}'$	$X_{5/6}'$
	0,0025	0,0030	0,0035	0,0035



Tablica 35: Kriteriji za klasifikaciju prijenosnog etalona Z4A/100 kN na udaljenosti 60 mm od aksijalne osi opterećenja

Sila,kN	$\bar{X}_{wr} (1-2),$ mV/V	$\bar{X}_r (1-3-5),$ mV/V	b, %	b, %	v,%	f <sub>c</sub> , %
10	0,20000	0,19997	0,006	0,04301	0,04852	0,01641
20	0,39993	0,39988	0	0,04051	0,02601	0,00649
30	0,59982	0,59975	0,002	0,03835	0,01718	-0,00275
40	0,79976	0,79967	-0,00125	0,03627	0,01776	-0,00115
50	0,99969	0,99959	-0,001	0,03622	0,01461	-0,00028
60	1,19964	1,19952	0,001	0,03635	0,01192	0,00034
70	1,39955	1,39943	0,00086	0,03502	0,00793	-0,00189
80	1,59958	1,59944	-0,00038	0,03576	0,00544	0,00188
90	1,79957	1,79941	-0,00056	0,03612	0,00189	0,00092
100	1,99955	1,99939	0,0001	0,03601		-0,00089